

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Master en Comunicaciones

Sistema de comunicación en tiempo real
basado en WSN para los miembros de un
equipo de espeleólogos

Tomas Laborra Barrau
Dr. Francisco Javier Falcone Lanas
Pamplona, 14 de Febrero de 2012

Agradecimientos.

Desde aquí quiero aprovechar para agradecer en primer lugar, a mi tutor Francisco Falcone, por darme la posibilidad de desarrollar este trabajo a partir de una idea propia, por animarme y guiarme fielmente en el desarrollo del trabajo y por dar solución a los problemas que me han surgido durante el proyecto. Agradecer también los aportes de Leire, Peio y, a Erik sobre todo, por las horas de desarrollo del código que han sido necesarias para llegar al escenario tan complejo, por las dudas que me han ido solucionando conforme me iban surgiendo y por darme información cuando más la requería.

Quiero agradecer también a la gente que se ha interesado por mí, que me ha ayudado dentro de lo posible y que ha creído en mí.

Hemendik eskerrak eman nahi dut Satorrak Espeleologi Taldeari ere, lan honen parte haundia haiei esker izan delakotz. Eskertu nahi dut eman didazuen guziangatik, lur-azpiaren mundua ezagutzen laguntzeagatik eta toki zoragarriek erakusteagatik, proiektu honen kolaborazio lanetan ibiltzeagatik ere. Nigan sinistu duzuelako eta zuen esku egon den guzia egin duzuelako, beti laguntzeko prest egoten. Milesker Arturo, Bittor, Jaime, eta Satorrakosatzen duzuen guziei!

Eskerrak eman diet nere lagun guziei ere, beren laguntasuna eskaintzeagatik eta momentu onak pasarazteagatik eta oraindik elkarrekin pasatuko ditugunak!

Esker berezi bat Amaiari, azken urte hauetan hor egoteagatik, edozer gauza aditzeko prest eta laguntzeko prest. Momentu onak pasarazteagatik eta momentu txarrak, onak bihurtzeagatik. Eskermile Amaia!

Pero si tengo que agradecer de verdad a alguien, es a mis padres, que sin el apoyo que he recibido durante todos mis años de formación no hubiese sido posible llegar hasta donde he llegado, por haber creído en mí y en mis posibilidades, por estar ahí cada vez que lo he necesitado y por apoyarme y guiarme en las decisiones que he tomado hasta ahora. Quiero agradecer también a mis hermanas, que sin ellas este trabajo hubiese resultado mucho más duro y costoso, por haberlo hecho más ameno. ¡Gracias Familia!

Gracias a todas las personas que habéis hecho parte de este proyecto.

¡Gracias a tod@s!

Eskermile denei!

Merci a tous!

Resumen

En este trabajo se analiza el comportamiento de la propagación electromagnética en una cueva a frecuencia de 2.4GHz. Se implementa un modelo de cueva en el que se tienen en cuenta las condiciones del entorno natural, donde los materiales y la morfología atenúan fuertemente cualquier señal electromagnética. A partir de este modelo se hace un análisis por tramos, dividiendo en escenarios distintos y ejecutando un código de lanzamiento de rayos 3D para estimar los niveles de potencia recibida. Los resultados obtenidos son contrastados con los datos medidos *in-situ* y demuestran la aproximación hecha mediante el trazado de rayos. Esto abre un abanico de posibilidades en la aplicación de redes de sensores en cuevas.

Abstract

In this work, the behavior of electromagnetic propagation in a cave is analyzed at a 2.4GHz. Cave model, that takes into account the conditions of the natural environment, where materials and morphology strongly attenuate any electromagnetic signal, is implemented. From an analysis of this model by sections, dividing in different settings and running code launched 3D rays to estimate the received power levels is made. The results are contrasted with data measured *in-situ* and demonstrate the approach made by ray tracing. This opens up a range of possibilities in the application of sensor networks in caves.

Índice:

1.	Introducción.....	6
2.	Objetivos TFM	7
3.	Estado del arte	8
3.1.	Ámbito Subterráneo/Espeleología.....	8
3.1.1.	<i>Historia de las comunicaciones en la espeleología.....</i>	8
3.1.2.	<i>Accidentes y rescates. Espeleosocorro.....</i>	10
3.1.3.	<i>Tipos y características de redes de comunicaciones subterráneas.....</i>	11
3.2.	Redes de sensores (WSN). IEEE 802.15	14
3.2.1.	<i>IEEE 802.15.4. Zigbee.....</i>	15
3.2.2.	<i>IEEE 802.15.6. WBAN.....</i>	17
3.3.	Radio propagación en entornos cerrados-confinados-hostiles.	19
3.4.	Estudios y trabajos relacionados con la materia.....	21
4.	Desarrollo	24
4.1.	Descripción del entorno.....	24
4.1.1.	<i>Marco Geológico.....</i>	25
4.1.2.	<i>Propiedades físicas de los materiales</i>	27
4.1.3.	<i>Propiedades eléctricas de los materiales</i>	28
4.1.4.	<i>Lista de resistividades, conductividades y constantes dieléctricas.....</i>	32
4.2.	Medida del escenario	35
4.3.	Recreación del escenario	37
4.3.1.	<i>Descripción del software utilizado.....</i>	37
4.3.2.	<i>Construcción del escenario.....</i>	38
4.4.	Resultados I. Simulaciones.....	41
4.4.1.	<i>Escenario I.....</i>	41
4.5.	Medidas en la cueva	43
4.5.1.	<i>Descripción de equipos y características.....</i>	43
4.5.2.	<i>Medidas realizadas en la cueva de Aierdi VIII.....</i>	46
4.5.2.1.	<i>Radiales y mediciones de potencia.....</i>	46
4.5.2.2.	<i>Medidas de PER (Packet Error Rate).....</i>	51
4.6.	Simulaciones II.....	52
4.6.1.	<i>Propiedades eléctricas distintas.....</i>	52
4.6.2.	Escenarios definidos por zonas	53
4.6.2.1.	<i>Escenario Parte I-10m</i>	53
4.6.2.2.	<i>Escenario Parte I-20m</i>	55
4.6.2.3.	<i>Escenario Parte I-50m</i>	56
4.6.2.4.	<i>Escenario Parte II-10m.....</i>	57
4.6.2.5.	<i>Escenario Parte II-20m.....</i>	59
4.6.2.6.	<i>Escenario Parte III-20m.....</i>	60
4.7.	Comparación entre simulaciones y medidas.....	61
4.7.1.	Radial de 50 metros reducida.....	62
4.7.2.	Radial de 50 metros	63
4.7.3.	Radial de 15 metros (estrechamiento)	64
4.8.	Comparación entre simulaciones I y simulaciones II.....	66
4.9.	Representación 3D de los resultados.....	67

5. Conclusiones.....	68
6. Líneas futuras	69
7. Bibliografía.....	70
8. Anexos.....	72
ANEXO I	72
ANEXO II	87
ANEXO III.....	89
ANEXO IV.....	91
Índice de Figuras y Tablas:	96

1. Introducción

El rápido avance en las tecnologías inalámbricas y en la miniaturización de los equipos, hace que las comunicaciones inalámbricas cojan un papel importante en nuestras vidas. Las posibilidades que brindan este tipo de tecnologías son muy amplias ya que pueden amoldarse a cualquier entorno ambiental. Además de la telefonía sin cable existe una infinidad de sistemas inalámbricos, como son la radiodifusión, las comunicaciones por satélite, etc. y todos estos sistemas tienen en común que utilizan el mismo canal para comunicarse, el espacio libre. Este canal, tiene sus limitaciones como pueden ser las interferencias, las condiciones climatológicas, pero además tiene un alcance dependiente de la distancia al cuadrado. Por tanto, la limitación más importante que existe en estos sistemas es el propio canal, puesto que no tiene todo el alcance que se desearía. En entornos geográficos más fuertes o más abruptos, la limitación es aún mayor y el alcance dependerá fuertemente del entorno.

Uno de los entornos geográficos más fuerte es el mundo subterráneo. Su difícil acceso hace que sea prácticamente imposible llevar cualquier equipo convencional de comunicaciones y pretender que funcione en el interior de una cueva, por ejemplo. Pero no son pocos los aficionados a la exploración de cuevas o las personas que desempeñan labores bajo tierra y en condiciones relativamente distintas a las que se tiene en la superficie. Estas actividades se desarrollan en un entorno hostil, en el que la seguridad es lo primero que se exige. La comunicación es una manera de aportar seguridad en estos entornos, y en ocasiones es necesario el uso de tecnologías para aumentar esa seguridad. Ejemplos como el de la minería, hace que existan productos desarrollados englobados en las comunicaciones inalámbricas en entornos subterráneos.

La mayor problemática de este tipo de comunicación es que el medio en el que se trabaja es fuertemente irregular y las ondas electromagnéticas chocan con materiales que poseen conductividades diferentes, caso del agua, suelo o roca. La frecuencia de trabajo es uno de los aspectos más influyentes a la hora de desarrollar un sistema de comunicaciones inalámbrico, y el que se utilice en estos entornos la dependencia es aún mayor si cabe. Se tiene que una señal de baja frecuencia podría atravesar el terreno, sin embargo el escaso ancho de banda y la frecuencia de la portadora presentan diversos problemas. Muchos equipos desarrollados para la comunicación en cuevas se basan en la utilización de frecuencias bajas. En cambio, una señal de alta frecuencia podría transmitirse a través de una galería y tendría mayor capacidad que un sistema a bajas frecuencias, pero cualquier obstáculo, intersección o cambio brusco de dirección la atenuaría gravemente. Por tanto el desarrollo y aplicación de estas tecnologías no resulta sencillo.

Gracias a los conocimientos que he ido adquiriendo durante estos años de formación, sumados al interés y conocimiento que tengo del mundo de las cavidades, ha hecho que me haya embarcado en el reto de llevar a cabo un estudio de la viabilidad para aplicar las últimas tecnologías en redes de sensores o WSN's, al mundo espeleológico.

2. Objetivos TFM

El objetivo de este trabajo se ha centrado en realizar un estudio de viabilidad del implemento de una red de sensores en cuevas para un equipo de espeleólogos.

El estudio puede desglosarse en varios objetivos que se plantearán a lo largo del desarrollo del proyecto. Uno de ellos será la recreación de un escenario complejo, como es una cueva, analizando las características del entorno y de los materiales. Luego, mediante software se realizará varias simulaciones en distintas localizaciones dentro de la cueva, con el método de trazado de rayos 3D, creando distintos mapas de cobertura y a distintas alturas. Se realizarán medidas in situ del escenario con equipos especializados, de los que se obtendrá datos de PER y potencias en enlaces punto a punto. Y se hará una comparativa entre los resultados obtenidos mediante las simulaciones y las medidas realizadas.

El proyecto se elaborará cuidadosamente, ya que se conocen de primera persona las necesidades que hay en el mundo de la espeleología. Y cuando sea necesario, se solicitará información a expertos en materias que se escapen de mis competencias, siendo de gran ayuda para que el proyecto se elabore de manera coherente.

Todo esto tiene una finalidad clara, desarrollar un trabajo que dé una solución viable para aplicar redes de sensores en la espeleología y en cualquier otra actividad a realizar en cavidades subterráneas.

3. Estado del arte

3.1. Ámbito Subterráneo/Espeleología.

3.1.1. *Historia de las comunicaciones en la espeleología.*

El ámbito en el que se centra este proyecto requiere una breve descripción de su desarrollo y de la historia, para comprender mejor en qué se basan estas comunicaciones.

La espeleología puede considerarse más una ciencia con su parte deportiva que como únicamente un deporte, porque son varias las disciplinas científicas que forman parte de ella. Nombrando algunas de ellas tenemos la geología, biología, paleontología, zoología, hidrología, mineralogía, petrología, y muchas más. El hecho de que la espeleología, en general, haya sido un medio bastante inaccesible para el hombre, hace que muchos elementos hayan pasado desapercibidos y ocultos en el mundo subterráneo durante millones de años. El avance en la tecnología de los materiales y en seguridad, ha hecho que esta actividad haya avanzado en los últimos tiempos, y haya dado mayor accesibilidad a estas zonas, que antes resultaban inaccesibles.

Si la comparamos con otras disciplinas, la espeleología es relativamente nueva. Los primeros exploradores del mundo subterráneo empezaron a formarse a finales del siglo XIX, aunque es a partir de la década de los 60's, del siglo pasado, cuando empieza a tener un gran auge. (Expediciones en la parte de los Pirineos, han sido las más relevantes en la difusión de esta actividad).

Uno de los aspectos imprescindibles de esta actividad ha sido y será siempre la seguridad. Sin ella, hubiese sido prácticamente imposible acceder a los lugares a los que se ha llegado. Cuerdas, anclajes, luces, buzos, cascos,... todos estos elementos son imprescindibles para la seguridad de un espeleólogo y todos han ido evolucionando conforme la tecnología ha ido avanzando en el tiempo.

Pero además de estos elementos, dentro de la seguridad existe el aspecto de las comunicaciones. Los equipos de comunicaciones también han sufrido cambios a lo largo de la historia, pero dentro de la espeleología lo ha sido en menor medida. Y es que el mundo subterráneo tiene una complejidad que dificulta, y mucho, el despliegue de cualquier red de comunicaciones, ya sea cableada, inalámbrica o híbrida. Esta complejidad se traduce sobre todo en la comunicación interna y, entre exterior-interior y viceversa. La comunicación exclusivamente en exteriores se centra en los equipos convencionales, en sus coberturas y en el alcance que tengan según la tecnología que se use. Caso de la telefonía móvil con redes GSM, GPRS, 3G,.... La utilización de walkie-talkies puede ser otra opción de comunicación en exteriores.

Pero este trabajo se centra en lo que son las comunicaciones en interiores y entre exterior-interior o interior-exterior de una cavidad subterránea. En estos entornos hostiles los equipos convencionales como los walkie-talkies o los teléfonos móviles pierden totalmente su función a causa de la baja señal recibida y de la gran atenuación que sufren. Por eso, lo que se utiliza normalmente, difiere de lo habitual.

La mayoría de la tecnología y de los equipos existentes en materia, trabajan a bajas frecuencias, o lo que es lo mismo, a longitudes de onda muy grandes. De esta forma consiguen un alto grado de penetración en la tierra. El origen de estos equipos, como en la mayor parte de los casos, fue militar. Y es que, durante la I. y la II. Guerra Mundial el avance de toda la tecnología de las telecomunicaciones fue considerable. Radares, sistemas de comunicaciones encriptados, utilización de frecuencias diferentes para evitar interferencias, todas estas estrategias, poco a poco fueron aplicándose al uso civil hasta nuestros días.

Un ejemplo claro lo tenemos con el sistema desarrollado por un sargento americano destinado al ejército francés, Ernest H. Hinrich. El sistema consistía en una comunicación a través de la roca para comunicarse entre trincheras. La transmisión se realizaba en el rango de frecuencias de 300 a 1.200 Hz., alcanzándose enlaces de hasta 3km a través de la roca y tierra. Las antenas tenían distintos tamaños y formas, en algunos casos las ponían sobre el suelo llegando a los 1500m de longitud. Los equipos eran pesados y poco prácticos.

A partir de ahí fueron desarrollándose sistemas basándose en la comunicación a través de la roca, sistemas como el FIGARO (Fire Groung Apparatus for Radio Operation, 1968) dio servicio a los bomberos de Londres en los accidentes ocurridos en túneles y sobre todo en el Metro [1].

Equipos más modernos o más actuales dentro del ámbito de la espeleología son el Heyphone o el Nicola. Ambos son muy parecidos en cuanto al funcionamiento se refiere. Utilizan baterías de 12V como alimentación y trabajan a frecuencias VLF, concretamente a 87 kHz, es decir, una longitud de onda de 3.5 km, en el aire. Pero la longitud de onda se reducirá hasta una fracción de la original, dependiendo del medio en el que se propague la señal. Están dotadas de dos antenas de hilo de cobre, con una longitud de unos 40 metros cada una. Y el escenario más común es un enlace de comunicación entre el exterior y el interior [2], [3].

El sistema llamado TEDRA (*Through Earth Digital Radio Appliance*) puede considerarse como el sucesor de los anteriores, ya que pasa a ser digital en vez de analógico. Fue diseñado por el Grupo de Tecnologías en Entornos Hostiles (GTE) de la Universidad de Zaragoza, en colaboración con Siemens España. Trabaja a frecuencias VLF como los anteriores pero 70kHz es la frecuencia de portadora con una modulación SSB (*Single Side Band*). Incorpora un DSP para tratar la señal de audio y se alimenta mediante baterías cargadas a 12V. La comunicación de voz es half-duplex y se utiliza el PTT (*Push To Talk*) para establecer la comunicación. Se ha llegado a establecer comunicación entre dos puntos separados más de 1000 metros entre sí y se ha llegado a enviar datos (electrocardiograma) [4] y [5].



Figura 3.1.a) Prototipo TEDRA. b) Esquema funcionamiento. [4], [5].

Pero si hay que mencionar un sistema de comunicaciones para entornos subterráneos, ese es el Genéfono. Es el más utilizado en aplicaciones de rescates y comunicaciones en entornos subterráneos, como cuevas, minas o túneles ya que no requiere de alimentación eléctrica. Girando el generador de tono de sirena se crea una tensión que hace que se genere un tono de sirena para dar el aviso de llamada y gracias a la vibración de la membrana del micrófono, la señal de voz se propaga a través de la línea bifilar. Es un equipamiento práctico porque una vez montada la línea puede establecerse comunicación sobre cualquier punto y es resistente a condiciones ambientales adversas. Por eso es un sistema utilizado en minería, donde existen zonas en las que pueden producirse explosiones de gas. Pero a diferencia de los sistemas citados anteriormente, es un sistema cableado y eso es un inconveniente cuando en los rescates, en zonas sin una infraestructura previa, se requiere rapidez y efectividad en el montaje. Otro de los inconvenientes que tiene es que sólo puede utilizarse para comunicaciones por voz, y esto hace que en casos de nivel de ruido alto, la señal de voz no sea inteligible.

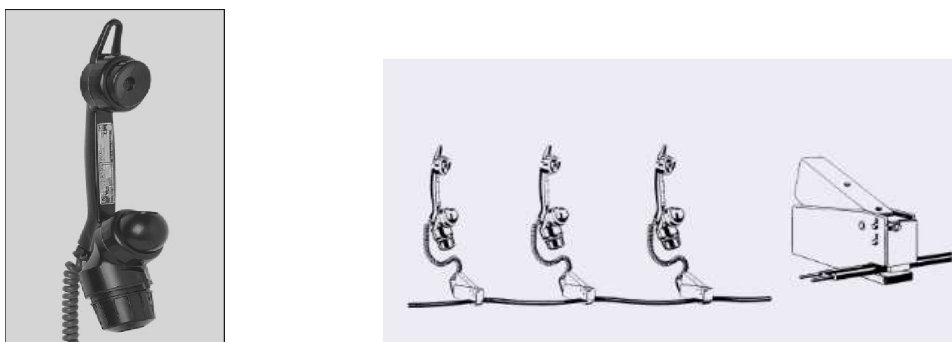


Figura 3.2.a) Genéfono. b) Esquema de conexión de los genéfonos mediante pinzas.
Ficha técnica del Genéfono de la empresa FHF Funke + Huster Fernsig GmbH

3.1.2. Accidentes y rescates. Espeleosocorro.

Todos estos sistemas de comunicaciones han sido utilizados en algún momento para situaciones de socorro en montaña y más concretamente en cavidades subterráneas. Y es que ante estas situaciones, la comunicación entre los servicios medicalizados, guardia civil, grupos de rescate, voluntarios de espeleosocorro, con las personas atrapadas, es fundamental. El tiempo que transcurre desde que se da el aviso hasta que los rescatados están a salvo, es muy grande. Pueden transcurrir muchas horas, incluso días, hasta que se tiene contacto directo con las víctimas dada la complejidad que supone desplegar este tipo de operativos. Durante todo ese tiempo es necesario estar en contacto permanente con las personas que están atrapadas y, en los peores casos, heridas. Por eso, conocer el estado en el que se encuentran, dar instrucciones durante el rescate o dar instrucciones de cómo actuar ante una lesión, herida o fractura es de vital importancia para que el operativo se desarrolle satisfactoriamente.

Es una práctica muy habitual el que grupos de espeleología de diferentes lugares se concentren anualmente para realizar estas prácticas de autosocorro, trabajando conjuntamente con compañeros de actividad y profesionales (guardia civil, bomberos,...). El que exista un sistema de comunicaciones fiable, seguro, práctico y adaptado a las condiciones del entorno es una necesidad, más que una opción. Y si el sistema consiste en prevenir riesgos tales como, desvanecimientos, hipotermia, temperatura corporal y demás, se dotaría de una seguridad mayor a la hora de realizar cualquier actividad subterránea.

Si se toma como referencia las comunicaciones para la seguridad y la prevención de riesgos en entornos subterráneos como la minería o túneles de la red ferroviaria, se pueden distinguir varios tipos de despliegues técnicos, dependiendo de su funcionalidad. A continuación se hace una clasificación de algunos de los tipos de infraestructuras existentes en estos entornos.

3.1.3. Tipos y características de redes de comunicaciones subterráneas.

Sin hacer un análisis exhaustivo de todas las redes de comunicaciones aplicables a entornos subterráneos, ya que eso daría para un proyecto entero, se van a mencionar sólo algunos de los más representativos por cada tecnología e infraestructura distinta que se utilice.

Dentro de las estructuras cableadas e híbridas se pueden distinguir los siguientes grupos:

Tecnología “Leaky-Feeder”. Cableado radiante o con fugas. Es un cable coaxial diseñado para que tenga fugas y radie fuera del cable. Frecuentemente utilizado en minería y túneles. El cable tiene una especie de ranuras por las cuales la potencia emitida sale y radia hacia el interior de la galería. Normalmente trabaja en la banda de frecuencias de UHF o VHF, esto hace que el alcance sea limitado y sea necesario tener un gran número de ranuras para que la señal exista a través de toda la galería. Esto implica que la señal se va perdiendo considerablemente por el cable. Por eso es necesaria la utilización de amplificación cada 350 metros aproximadamente. Se puede utilizar tanto para recibir como para emitir, dependiendo de la capacidad que se quiera se pueden utilizar hasta 64 canales.



Figura 3.3 . “Leaky feeder”

Antenas distribuidas y sistemas celulares. Consiste en montar estaciones base, como las de telefonía, pero dentro de la cavidad, lo que supone que haya que llevar el cableado de cobre o de fibra necesario hasta ellas.

Híbrida (cable/fibra + inalámbrico). En la siguiente figura, se muestra un ejemplo de una red subterránea inalámbrica con infraestructura cableada, lo que podría considerarse como una solución híbrida. Está dotada de Switches de Red Inalámbricos (WNS) y Access Points inalámbricos con soporte PoE combinados como nodos de red subterráneos. Estos dispositivos en minería incorporan más capacidades que un equipo convencional. La topología más usada para este tipo de redes es en estrella, pero esto requiere de muchos puntos de alimentación. Por lo que se hace uso de “cables combinados” que además de dar conexión a los enlaces de fibra óptica, distribuye la energía de

alimentación a voltajes bajos (10V). Los equipos finales se conectan a equipos compatibles con diferentes tecnologías, 802.11, 802.15, tags RFID, para funciones de proximidad de vehículos, localización de mineros, monitoreo del entorno, y demás factores que resulten interesantes de controlar, siempre que sean compatibles con la tecnología de los equipos.

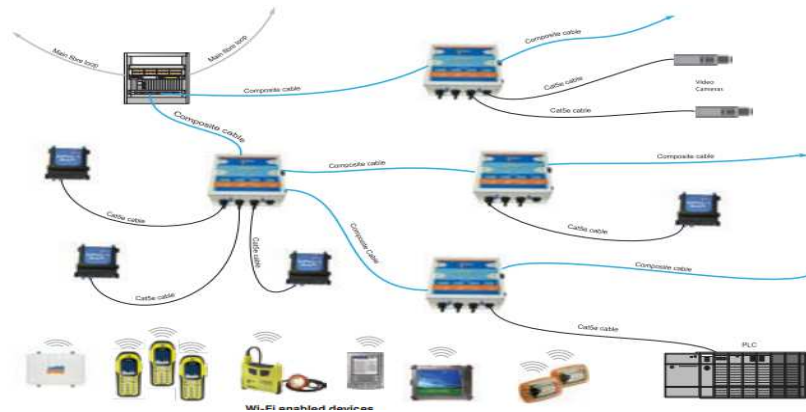


Figura 3.4. Esquema de infraestructura en mina.
Solución propuesta por Mine Site Technologies para el despliegue de una red.

Dentro de los sistemas de comunicaciones inalámbricos hay diversidad en cuanto a la tecnología utilizada, la frecuencia, y el medio por el que se transmite la señal electromagnética. Por eso a continuación se dan algunos de los más representativos de cada uno:

Acoplamiento a conductores. Consiste en el aprovechamiento de las líneas de ferrocarril o de metro, que puedan existir en el entorno, como medio de transporte de las ondas electromagnéticas mediante acoplo a frecuencias de LF o MF.

Propagación natural en túneles. La misma galería de la mina o el túnel es el canal de propagación de las ondas electromagnéticas. Actúan como guías de onda, aunque lo complicado de esto es conocer la geometría, la conductividad y la permitividad relativa de las paredes, para así calcular la frecuencia de corte y poder utilizar este fenómeno. El efecto que produce tener abundancia de obstáculos o cambios bruscos de dirección es destructivo en la señal.

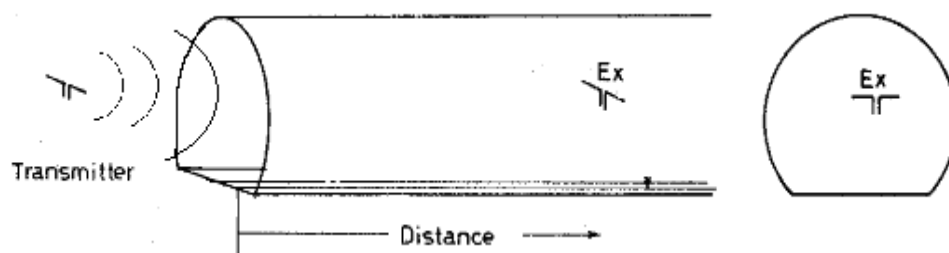


Figura 3.5. Representación de propagación natural en túnel.[6]

Comunicación a través de la roca. También llamado TTE (Through-The Earth). Es bien conocido que las ondas electromagnéticas son atenuadas al atravesar medios disipativos tales como, suelos, rocas, agua, que tienen conductividad relativa elevada. Por eso para este tipo de tecnología se utilizan frecuencias con longitudes de onda grandes o muy grandes (1km-30.000km) o lo que es lo mismo, bandas de frecuencia ELF, VLF o LF. Los sistemas citados en el punto 3.1.1, como el TEDRA o el Nicola, son algunos de los equipos que pertenecen a este grupo.

WSN (Wireless Sensor Networks). Estas redes pueden estructurarse en tres topologías distintas, estrella, árbol o tipo *mesh* (mallada) (ver figura 3.6.). Normalmente se suelen configurar como redes ad-hoc, de manera que un gran número de nodos estáticos o móviles estén desplegados, con capacidad para autoconfigurarse. Son conocidos también como redes multisalto ya que sus nodos adquieren la función de encaminamiento de mensajes comunicándose siempre con el vecino más próximo. El auge que está teniendo este tipo de tecnología para redes de sensores abre nuevas puertas para utilizarse, por ejemplo, como tecnología para las comunicaciones subterráneas. Al ser un sistema inalámbrico en el que todos los nodos se comunican entre sí y se autoorganizan de forma dinámica en una red de comunicaciones que no necesita de infraestructura cableada, hace que sea fácil de aplicar y de mantener.

Esto es muy importante, ya que muchas aplicaciones requieren cientos o incluso miles de sensores, que además se tienen que colocar en lugares remotos y difícilmente accesibles. Por tanto, un sensor inalámbrico no es solamente un componente para sensar, sino que tiene que ser capaz de procesar señales, de comunicarse y de realizar otras funciones específicas según la aplicación requerida en cada caso.

Muchas veces, el sensor no sólo es responsable de los datos que ha adquirido, sino que participa en la creación de la red, la búsqueda de caminos y la transmisión de los datos de otros sensores.

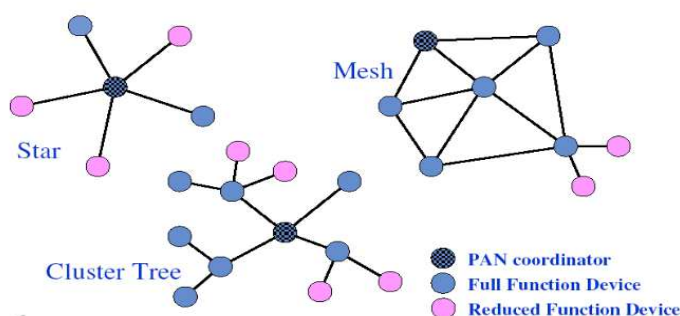


Figura 3.6. Topologías típicas de WSN's.

Cada una de las tecnologías explicadas tiene sus ventajas e inconvenientes por eso no es sencillo decantarse por una en concreto. Las cableadas tienen varios inconvenientes, frente a las inalámbricas. Y es que ante una explosión, un derrumbamiento, o un simple corte eléctrico, la rotura del cable, incomunicaría a la persona o al entorno con el que se quiere establecer un enlace. Además el tendido del

cable requiere un tiempo del que a veces no se tiene para actuar, porque en cualquier situación de rescate el ahorro de tiempo es primordial, ya que vidas humanas dependen de ello. El poco margen de movimiento del individuo sin que se pierda comunicación es otro factor a tener en cuenta si se depende de un cableado.

Las soluciones inalámbricas en cambio, aunque dependan de los factores del entorno (rocas, humedad, obstáculos,...) dan la posibilidad de movimiento y de reconfigurar. El que sean fáciles y rápidas de montar hace que se conviertan en una solución eficiente.

3.2. Redes de sensores (WSN). IEEE 802.15

Tal y como se ha desarrollado el trabajo, uno de los aspectos que debe mencionarse en este apartado es la definición de los aspectos básicos de las redes inalámbricas de área tanto personal como corporal. Es importante definir bien el concepto de cada una y la función que tienen.

Estas redes pertenecen al estándar definido por el IEEE como 802.15 con los distintos grupos de trabajo, los cuales definen distintos tipos de WPAN's en función de la aplicación que vayan a tener. Estas especificaciones definen parámetros como la tasa binaria, la calidad del servicio o el consumo energético, pero todas ellas son de conectividad inalámbrica de corto alcance entre dispositivos en el entorno personal ($\approx 10\text{m}$) y todas tienen unos objetivos en común: eliminar cables, conexiones con mínima infraestructura e interoperabilidad entre dispositivos. En la figura siguiente se muestran los distintos grupos de trabajo dentro del 802.15.

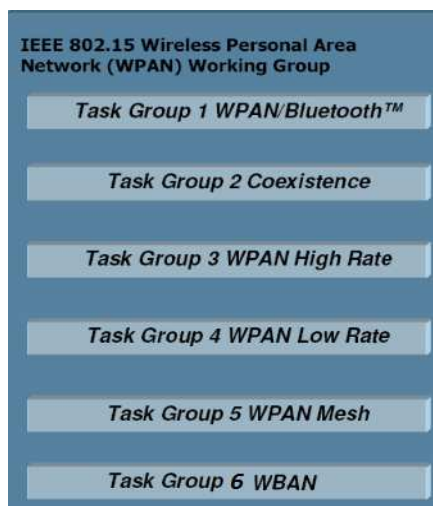


Figura 3.7. Grupos de trabajo del estándar del IEEE 802.15. [7]

A raíz de estos grupos de trabajo existen otros estándares fundamentándose en las bases definidas. Uno de los casos más significativos es el de Bluetooth, ya que el estándar 802.15.1 describe las bases de las dos primeras capas de la torre OSI, es decir, capa física (PHY) y capa MAC (Medium Access Layer) y lo demás lo define el propio estándar Bluetooth.

3.2.1. IEEE 802.15.4. Zigbee.

Con 802.15.4 (LR-WPAN) y Zigbee pasa prácticamente lo mismo. La norma del IEEE define las dos primeras capas y por encima de estas se establecen las especificaciones definidas por la Zigbee Alliance en 2004 (fig.3.8.). El protocolo fue creado específicamente para comunicaciones de corto alcance en redes de sensores de bajo consumo utilizando una baja velocidad de transmisión de datos y de poca complejidad. En versiones posteriores (802.15.4-2006, 2011) se incorporaron nuevas capacidades, como la movilidad de los nodos, lo que dio un margen más amplio de aplicaciones.

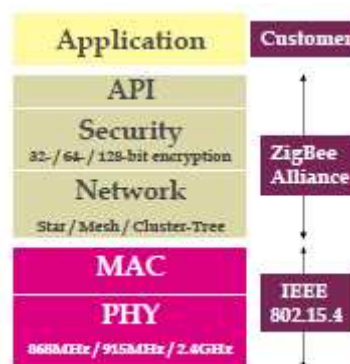


Figura 3.8. Capas Zigbee.

Entrando directamente con las características básicas del estándar 802.15.4, el primer punto importante es la frecuencia. Trabajan sobre las bandas ISM esto es, que en Europa trabaja a 868MHz y 2.4GHz, y en EE.UU. 915MHz y 2.4GHz, lo que hace que sea de uso libre y pueda utilizarse en prácticamente el mundo entero.

La velocidad máxima de transmisión es de 250 kbps, lo que daría para satisfacer aplicaciones de altas prestaciones, aunque es escalable a las necesidades de monitorización, hasta bajar a los 20kbps o menos si fuese necesario. Además de las características ya mencionadas hasta ahora, se pueden mencionar algunas más:

- Operación con topologías en estrella o *peer to peer*.
- CRC de 16 bits, usado en cada paquete que se transmite, así asegurando que cada bit de los datos transmitidos es correcto.
- CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance), con lo que se evitan colisiones en el canal, ya que ZigBee antes de transmitir escucha, y sólo transmitirá cuando el canal esté libre. También puede acceder al canal mediante ALOHA.
- Protocolo totalmente reconocido por su fiabilidad en transferencia. Incorpora ACKs en cada salto y ACKs End-to-end. Cada paquete puede ser retransmitido hasta 3 veces (un total de 4 transmisiones). Para verificar la recepción de los datos por parte del destinatario final. ZigBee desecha cualquier paquete duplicado, por lo que la aplicación no deberá hacerlo.

Un sistema conforme a la norma consta de varios componentes. El más básico es el dispositivo. Dos o más dispositivos que se comunican en el mismo canal físico constituyen una WPAN. Sin embargo, esta WPAN incluye al menos un FFD, que funciona como el coordinador PAN.

Por tanto, dentro de una red IEEE 802.15.4 existen dos tipos de dispositivos diferentes: un dispositivo de función completa (FFD) y un dispositivo de función reducida (RFD). Un FFD es un dispositivo que es capaz de servir como coordinador en una red de área personal (PAN) o como simplemente coordinador y además puede trabajar como si fuera un RFD. Un RFD, es un dispositivo que no es capaz de dar servicio, como coordinador PAN, está diseñado para aplicaciones muy simples, como un interruptor de luz o un sensor infrarrojo pasivo, es decir, no tiene la necesidad de enviar grandes cantidades de datos y sólo se asocia con un solo FFD a la vez. En consecuencia, el RDF puede ser implementado usando un mínimo de recursos y la capacidad de memoria. Estos dispositivos pasan la mayor parte del tiempo en modo ahorro de energía, con esto se consigue un alargamiento de la vida de las baterías.

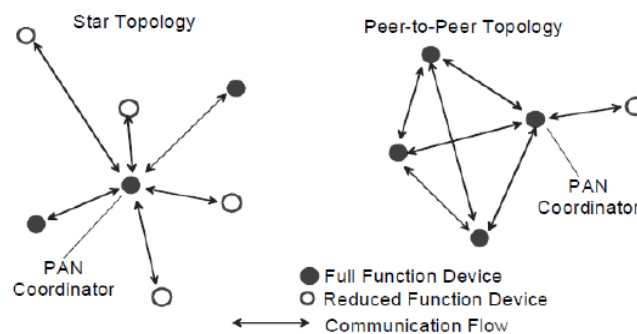


Figura 3.9. Topologías estrella y punto-a-punto, típicas de las redes 802.15.4. [7]

El estándar ZigBee utiliza terminología ligeramente diferente: Un coordinador ZigBee es en un estándar IEEE 802.15.4 un coordinador PAN. Un router ZigBee es un dispositivo que puede actuar como un coordinador IEEE 802.15.4. Y un dispositivo final ZigBee es un dispositivo que no es ni un coordinador ni un router. Tiene el tamaño mínimo de memoria y capacidad de procesamiento. Es el dispositivo menos caro en la red.

Todos los métodos de comunicación inalámbrica de IEEE 802.15.4 usan las técnicas de DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) o PSSS (Parallel Sequence Spread Spectrum) para mejorar el rendimiento del receptor.

Es importante apuntar que un dispositivo compatible con ZigBee también es compatible con IEEE 802.15.4.

3.2.2. IEEE 802.15.6. WBAN.

Con la disminución del tamaño y el aumento de la capacidad de los dispositivos electrónicos, era inevitable que los dispositivos pequeños y portátiles fueran desarrollándose para las comunicaciones en el entorno del cuerpo humano. El estándar IEEE 802.15.6-2012 es un estándar para comunicaciones inalámbricas de corto alcance, como en los anteriores, pero aplicable a las proximidades del cuerpo, o para dentro de él (aunque no limitado sólo al humano). Por lo general, utiliza bandas industrial-científico-médicas existentes (ISM), así como bandas de frecuencia, aprobadas por las autoridades médicas y / o reguladoras nacionales. El campo que mejor se adapta a las condiciones del estándar es el campo de la medicina. Los dispositivos funcionan con muy baja potencia de transmisión para la seguridad y así reducir al mínimo la tasa de absorción específica (SAR) en el cuerpo y aumentar la duración de la batería. Las velocidades de transferencia de datos pueden llegar hasta los 10Mbps y es compatible con calidad de servicio (QoS) para alertar, por ejemplo, de una emergencia por mensajería [8].

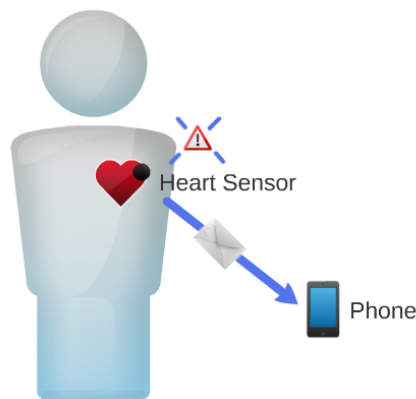


Figura 3.10. Representación de envío de datos del corazón al móvil.

Dado que algunas de las comunicaciones pueden transportar información sensible, se puede dotar de una seguridad en los nodos. Se definen tres niveles de seguridad: nivel 0 (sin seguridad), nivel 1 (únicamente autenticación) y nivel 2 (autenticación y encriptación). La selección de nivel se define según la aplicación y requerimientos que vaya a tener y se efectúa en el momento que el nodo se une a la red [8].

A continuación se citan las partes componentes de un sensor o nodo [9]:

- Sensor: Es el encargado de medir la señal requerida, que en algunos casos actúa dentro del cuerpo humano.

- Batería: Proporciona la energía requerida. En ocasiones, si el consumo es muy bajo, puede aprovecharse la energía desprendida por el cuerpo para utilizarla como alimentación. Esto hace que se pueda miniaturizar aún más el nodo en cuestión.

- Procesador: Analiza los datos y los gestiona.

- Antena: Necesaria para transmitir la señal de un nodo a otro, o a un agente externo. Investigaciones recientes han planteado la posibilidad de utilizar el cuerpo humano como canal de transmisión.

Si se pasa a la descripción de la arquitectura de la red de área corporal, esta se compone de uno o varios BSU's (Body Sensor Unit), un BCU (Body Central Unit) y ocasionalmente se tiene un enlace con una red de alcance mayor. Los BSU's son los encargados de tomar datos y estadísticas de la persona u objeto que se desee sensar. Un ejemplo podría ser que un sensor estuviese recogiendo datos de la glucosa en sangre de una persona diabética. Estos datos se mandarían a un BCU, que sería el encargado de recoger los datos y mandarlos a una red de alcance mayor.

La manera en que se manden los datos de un BSU a un BCU puede ser distinta según los requerimientos. Una forma es que el sensor que captura la información esté continuamente mandando los datos al BCU pero esto hace que se consuma mucha energía. Una forma más eficiente es la de mandar los datos periódicamente, por ejemplo, una vez al día. Así el sensor va almacenando los datos para mandárselos de golpe. Aunque la forma más eficiente de mandar los datos es utilizando el canal sólo cuando el sensor detecte una anomalía en la información sensada. Esto requiere hacer un estudio estadístico de la información que se vaya a sensar y definir los rangos en los que se mueve la información adquirida. Si en algún momento se produjese alguna anomalía en esos datos el sensor automáticamente mandaría esa información al BCU y este lo mandaría a una red de mayor alcance [9].

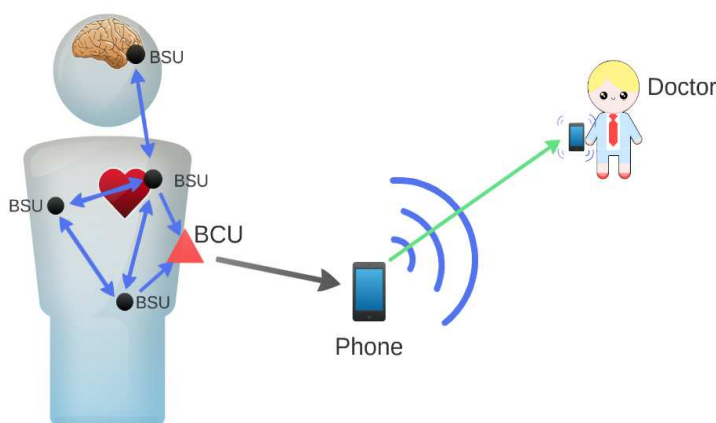


Figura 3.11. Representación de arquitectura de red IEEE 802.15.6

Las aplicaciones descritas tienen un dominio en común, el de la medicina y la monitorización de los pacientes y en este dominio es donde mayor cantidad de aplicaciones surgen este tipo de tecnologías. Tal y como se dice en [9] las posibilidades de aplicaciones médicas son amplias ya que hacen más fácil el seguimiento fisiológico de los pacientes, más barato y supone una involucración menor del paciente. También pueden ayudar a personas discapacitadas, tales como ciegos, monitorizando la tensión muscular o controlando prótesis de cualquier tipo.

Aún así, el uso del estándar no se limita a las aplicaciones médicas únicamente, sino que tiene cabida en aplicaciones socio-lucrativas, como en juegos interactivos, en vídeos 3D, en vídeo *streaming* o en el deporte. Combinando esta última con las aplicaciones médicas es donde puede aprovecharse las ventajas de las redes BAN con las actividades asociadas al ámbito espeleológico y a partir del cual se forja la idea de realizar este proyecto.

De todas formas, dentro del análisis del estado del arte, una vez analizados los dos puntos anteriores, se pretende conocer un aspecto importante previo al desarrollo del proyecto.

La radio propagación en entornos cerrados, confinados u hostiles y analizar los fenómenos que se producen en ellos, es el aspecto del que se hablará a continuación.

3.3. Radio propagación en entornos cerrados-confinados-hostiles.

Una vez analizado la evolución de las comunicaciones en el ámbito de la espeleología y de haber expuesto las tecnologías más actuales aplicables a este mismo ámbito, resulta necesario analizar el medio por el que las ondas electromagnéticas van a propagarse, y el comportamiento de estas en las condiciones en la que se encuentra el entorno.

Para empezar, describir el entorno en el que se centra el proyecto, es decir, las cavidades subterráneas, tiene una dificultad considerable, ya que cada caso de estudio tendrá distintas características. Por tanto, no puede tomarse una descripción general para todos los casos posibles. Aún así, existen algunas consideraciones por las que se puede partir para hacer una descripción del entorno. Partiendo de las definiciones de cerrado, confinado y hostil, tenemos que la primera describe un espacio delimitado, ya puede ser por paredes, cristal, tierra o roca. La segunda, nos indica que el acceso al área tiene restringidas la entrada y/o la salida, o es de difícil acceso. Y la tercera, denota un área poco agradable.

Trasladando estos términos a la propagación de las ondas, tenemos que estas se verán afectadas en mayor o menor medida a las características descritas. El que un área esté cerrada hará que las ondas no se propaguen libremente durante todo el trayecto, sino que se producirá un choque entre la onda y lo que delimite ese área. Ahí pueden entrar varios fenómenos de propagación en juego, por un lado, la onda rebotará y se producirá el fenómeno de la reflexión, por otro, la energía será absorbida, produciéndose una atenuación, dependiente de las características del material. Y por último, la onda transmitida al medio será refractada según el ángulo de incidencia. En la siguiente puede verse mejor estos fenómenos.

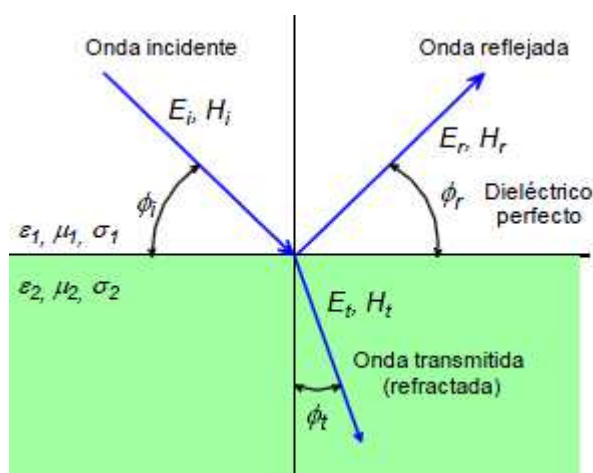


Figura 3.12. Representación de reflexión y refracción.

Si además las paredes que delimitan esa área tienen variaciones de dimensiones mayores que $\lambda/8$ la superficie se considerará rugosa y se producirá el fenómeno de la dispersión (*scattering*), enviando la señal en varias direcciones.

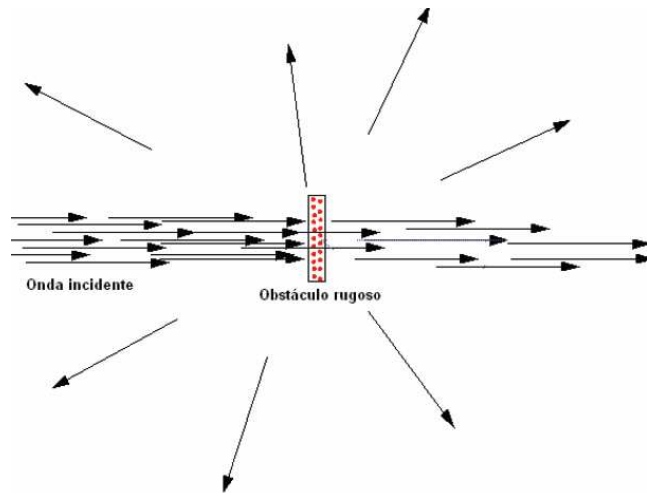


Figura 3.13. Representación de dispersión

El fenómeno de la difracción ocurre cuando una onda electromagnética incide en una arista, una esquina, o en un objeto muy fino o estrecho. Al incidir una onda sobre un obstáculo con estas características, el obstáculo se comporta como una nueva fuente para esta onda, rerradiando parte de la energía recibida, posibilitando así la recepción en lugares que antes no era posible por falta de visión directa.

Por último, si tenemos que el entorno es hostil, se puede pensar en que existirán muchos obstáculos dentro de la trayectoria de los rayos, en que el ambiente será muy húmedo o en que se producirán todo tipo de impedimentos para la libre propagación de las ondas.

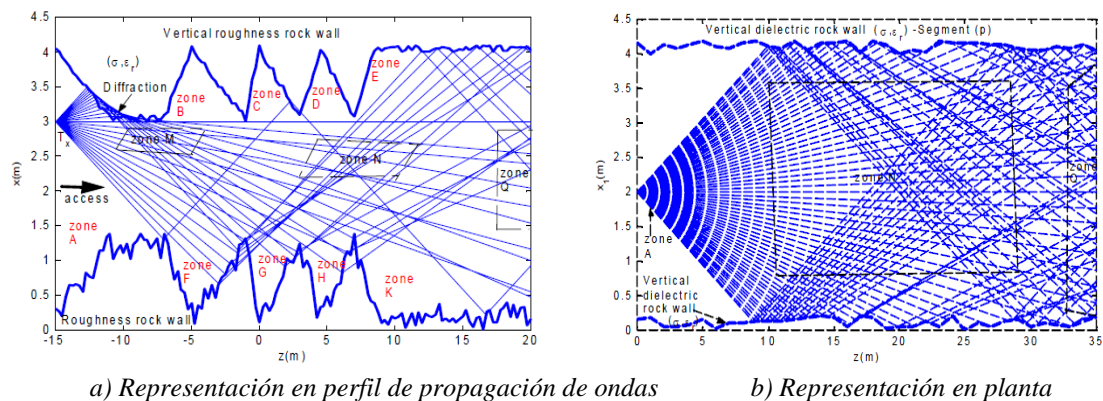


Figura 3.14. Representación de la propagación de ondas en un escenario hostil [10], [11].

En la figura 3.14a), se distinguen varias zonas, la zona A representa la zona de campo cercano, en la que se puede apreciar el fenómeno de la difracción. Las zonas de la B a K se definen como zonas en las que los fenómenos de reflexión, dispersión y difracción tienen relevancia en la señal. La zona Q, es la zona definida como campo lejano en la que se aprecia la propagación multitrayecto.

Los escenarios que se van a estudiar en este trabajo son un claro ejemplo de entornos complejos, puesto que existen numerosos elementos que van a interferir en la comunicación, provocando reflexiones, difracciones, dispersión y absorciones de energía. Por lo tanto, los receptores recibirán una señal que se va a componer de la suma de las señales recibidas por diferentes caminos. Cuando la comunicación se da en estas condiciones, se habla de propagación multitrayecto.

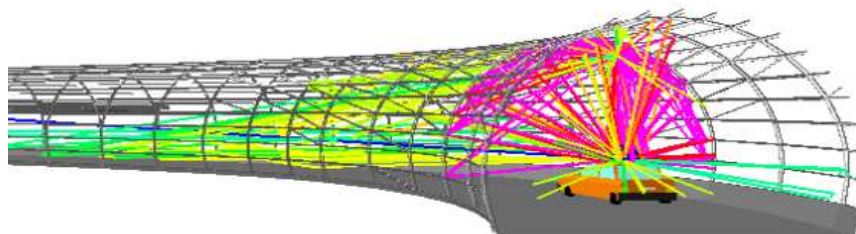


Figura 3.15. Representación de la propagación multitrayecto en un entorno hostil (túnel). Imagen adquirida del simulador de trazado de rayos de la empresa AWE-Communications.

3.4. Estudios y trabajos relacionados con la materia.

Después de haber definido y expuesto conceptos que impliquen un mejor entendimiento del trabajo desarrollado, como apartado final al estado del arte, se han recogido diversos artículos relacionados con el tema del proyecto que se pretende desarrollar.

A continuación se citan algunos de los más relevantes y se da una idea básica de en qué consiste cada uno.

Empezando el análisis por trabajos realizados en cavidades subterráneas naturales, se tiene ejemplos de estudios de viabilidad en la implementación de redes de sensores en cuevas, caso de [12], donde proponen un diseño de la arquitectura de la red, explicando la forma en la que deberían colocarse los sensores pero sin indicar la frecuencia ni la tecnología a utilizar. Otros trabajos, como los ya mencionados [4-5], hacen uso de bajas frecuencias LF o VLF para la transmisión de voz y en menor medida datos gracias a la penetración de las ondas en la tierra, estableciendo enlaces desde exterior al interior de la cueva.

Como es de suponer, la mayoría de los trabajos se centran en la industria de la minería y en dar seguridad a estas, dotándoles de tecnologías inalámbricas. Trabajos como [13], estudian la posibilidad de implementar tecnología Zigbee en las galerías de la minas, para aplicarlo en caso de catástrofe en el interior de la mina y de poder indicar a los mineros la salida correcta. Es decir, que se utilizaría a modo de localización e indicador de navegación bajo tierra para los mineros. Los tests y resultados obtenidos, parecen demostrar que la solución es factible a varias centenas de metros dependiendo de la potencia del emisor. Pero hay que tener en cuenta que las medidas se han realizado en túneles artificiales y galerías homogéneas y con visión directa, como se puede ver en la siguiente imagen.

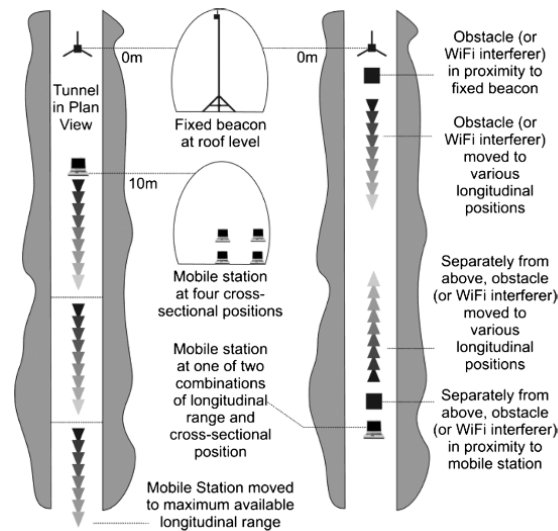


Figura 3.16. Representación esquemática de las pruebas descritas en [13].

Son varios los trabajos en los que analizan las características del canal en minas y túneles, a frecuencias UHF, 2.4GHz, 5.8GHz [14-19] incluso en la banda de 60 GHz como se recoge en [20] y en todos se destaca la importancia de mitigar el efecto del multitrayecto, incluso algunos dan soluciones como utilizar técnicas MIMO para compensar las pérdidas que se producen.

Pero limitando la documentación exclusivamente a trabajos realizados en cuevas la cantidad se reduce a unos pocos. Artículos como [21], utiliza frecuencias UHF en los que se hacen medidas experimentales de RSSI (Radio Signal Strength Indicator) en una cueva o mina antigua, alcanzando decenas incluso centenas de metros con visión directa y galerías como las que aparecen en la figura.

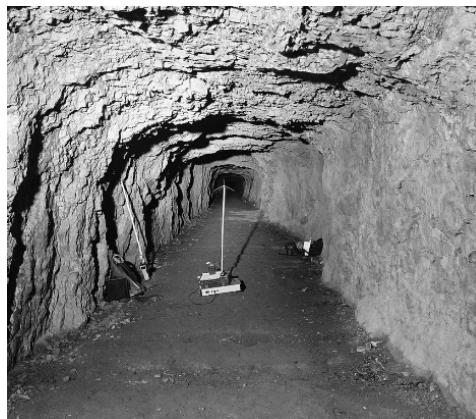


Figura 3.17. Fotografía de una galería de una mina antigua obtenida de [21].

Pero si cabe mencionar artículos en los que se estudia la radio propagación en cuevas, estos son los artículos [23] y [24] sacados de la revista especializada en electrónica aplicada a la espeleología, *Speleonics*. En dichos documentos se explican experimentos realizados con walkies-talkies a frecuencias UHF y VHF en el interior de una cueva, y pruebas de comunicaciones del interior a la superficie.

Por lo recogido hasta aquí, no se ha visto ningún estudio basado en comunicaciones con redes de sensores para transmitir voz y/o datos, utilizando tecnología Zigbee y en el que se haya hecho un estudio de los materiales existentes en la cueva y de simulación de trazado rayos 3D. Todos tienen similitudes con la idea del presente trabajo, pero puede que en función de los resultados que se obtengan, el presente estudio sea un importante aporte al mundo de la espeleología y la seguridad de los espeleólogos.

4. Desarrollo

A medida que se avanzaba en el proyecto se han ido tomando distintas vías de trabajo, empezando por estudiar el funcionamiento del código del trazado de rayos 3D. Una vez entendido su funcionamiento, se ha diseñado el escenario acorde a las medidas recogidas en un trabajo anterior, que se escapa de las competencias establecidas. Mientras que se recreaba la cueva elegida, se recogía información de las características de la misma, siendo necesaria la consulta a expertos en geología, geofísica, edafología y la consulta en documentación externa relacionada con parámetros específicos. Una vez recogida información suficiente del entorno para recrear la cueva se comenzaba con las simulaciones y de forma paralela se empezaba a planificar medidas en la cavidad.

En los siguientes apartados se explica de manera concreta y detallada los pasos citados en el párrafo anterior, empezando por una descripción de la localización, del entorno de la cueva, y de sus características físicas.

4.1. Descripción del entorno

Una vez que la idea del proyecto propuesto se puso en marcha, el primer paso fue elegir un escenario que cumpliese las condiciones para la realización del mismo.

Aprovechando la realización de unas prácticas de topografía, correspondientes al curso de perfeccionamiento en espeleología con el G.E.S (Grupo Espeleológico Satorrak), actividad que lógicamente se desarrolló fuera de la docencia, se escogió la cueva en la que se estuvo practicando. La cueva escogida, se la conoce por el nombre de Aierdi-VIII en el catálogo espeleológico de Navarra. Aierdi es una ladera perteneciente al municipio de Lantz, situada a 2,6 km del pueblo (ver figura 4.2.a.), en la zona norte de la provincia Navarra, España.

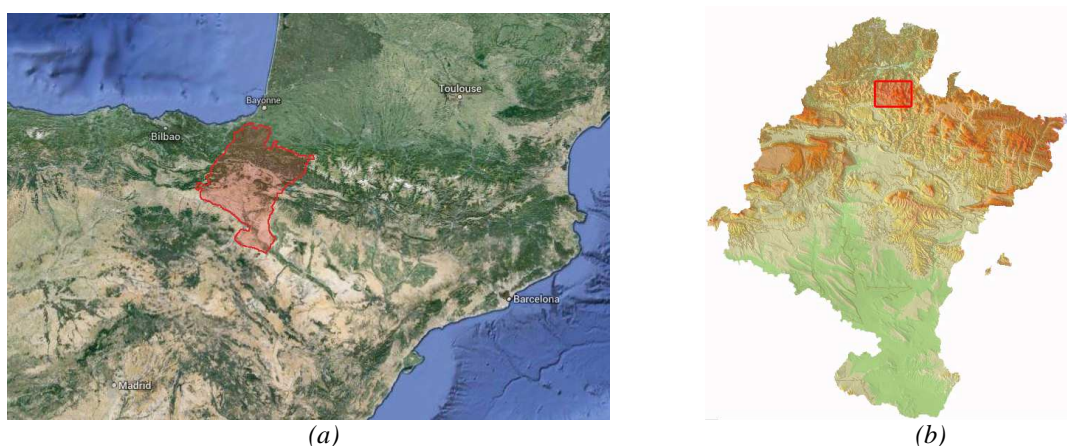


Figura 4.1. (a) Situación geográfica de Navarra. (b) Área de Navarra en la que se encuentra Lantz

El lugar, con un bosque de hayas en las estribaciones del monte Aierdi, además de la ya mencionada cueva de Aierdi-VIII, abarca un conjunto de diez cavidades situadas en torno al barranco del Txorrostarrikoerreka, en las laderas de Aierdi y Otaño (ver figuras 4.2.a y 4.2.b).

Más de una, presenta galerías artificiales que documentan un trabajo de minería, de la época romana [25].

Tal y como se comenta en [25] se pueden diferenciar dos tipos de galerías artificiales de minería de la época romana: galerías de explotación, de sección circular, excavadas con ayuda del fuego, que presentan las paredes muy lisas y cóncavas. Y galerías de extracción de mineral, de formas irregulares, siguiendo la vena metalífera, excavadas con las herramientas propias de la época (mazas y piquetas).

La mayoría son cuevas naturales, en las que la acción de infiltración de las aguas sobre las dolomías ha producido la disolución de la roca, generando conductos y huecos por karstificación y, alterando la calcopirita, dando lugar a una serie amplia de minerales, de hierro y cobre principalmente. Algunas de ellas son de gran belleza por la gran cantidad de minerales que contienen (aragonito, calcopirita, cuarzo, hierro, cobre,...) dando colores azules y verdosos, y también por su concentración de espeleotemas (estalactitas, estalagmitas, excéntricas,...).



Figura 4.2. (a) Ubicación de la cueva. (b) Área de Navarra en la que se encuentra Lantz. Datos obtenidos por el G.E.S (Grupo Espeleología Satorrak)

4.1.1. Marco Geológico

Para obtener información litológica de la zona de estudio, se intentó recopilar datos de personas ligadas al ámbito geológico, contactando primeramente con geólogos de la Escuela de Ingenieros Agrónomos de la UPNA (Universidad Pública de Navarra), geólogos del Gobierno de Navarra y más tarde de la Universidad de Zaragoza. Gracias a la ayuda de todos ellos se pudo obtener información suficiente para exponer las características de los materiales y de sus propiedades.

A grandes rasgos, los materiales litológicos que afloran en la zona según [26], están representados por una potente serie carbonífera de dolomías, de edad Namuriense, surcada por el Txorrostarrikoerreka, y de norte a sur, por pizarras y esquistos del Westafaliense. Las mineralizaciones de calcopirita que aparecen en las dolomías Namurienses, vienen representadas por venas y diques de orientación sensiblemente Norte-Sur.

En la siguiente imagen (figura 4.3.) se puede observar un extracto del mapa geológico de Navarra y su respectiva leyenda, correspondiente al área de estudio y del que se pueden extraer los datos litológicos. El emplazamiento de la cueva, corresponde a un determinado color con su numeración correspondiente. Según esto, la cueva está situada en una zona de dolomías, pizarras y esquistos (nº 47, año 2010), pero dependiendo de la fuente, la misma

numeración (nº 47, año 2013) y el mismo emplazamiento está constituido por dolomías con pizarras y calizas. Hubiese sido interesante haber realizado un corte geológico en las cercanías de la cueva para visualizar el perfil de las distintas capas.

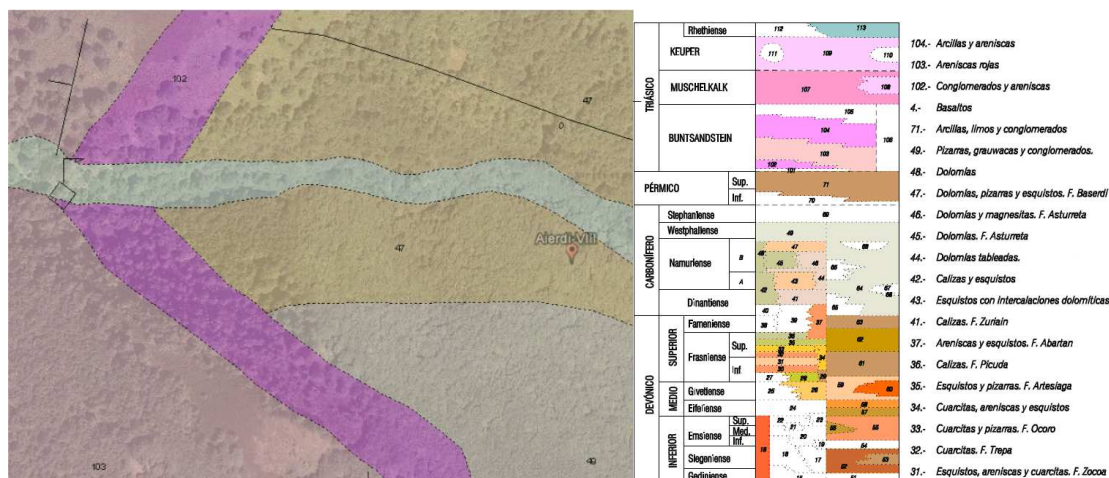


Figura 4.3. Mapa geológico correspondiente a la zona de estudio y su respectiva leyenda.

Mapa extraído de la página web del Gobierno de Navarra de la sección de geología.

Remarcar que dependiendo de la fecha de los mapas consultados, los valores correspondientes al número 47 diferían. Se toma por bueno el valor más actualizado.

Aún así, conocidas las dimensiones de la cueva, se puede añadir otra zona con distintas características y numeración (nº49). En este caso las dos fuentes consultadas coinciden y están definidas como pizarras, grauwacas y conglomerados.

Si se observa la leyenda se puede definir la edad a la que corresponden los dos resultados. El primero mencionado corresponde al Namuriense B y el segundo al Westphaliense, siendo los dos del Carbonífero.

Una vez obtenidos estos datos se puede pasar a la descripción de los mismos, dando una primera idea de sus características generales para luego enfocarlo hacia un plano más geofísico, dando las propiedades eléctricas de cada uno.

Si tomamos como material más frecuente en el área definida, las dolomías, se concluye que es una roca compuesta mayoritariamente por dolomita, carbonato doble de Ca y Mg. Las dolomías raramente son puras, ya que la dolomita forma una serie de transición continua con las calcitas. Por experiencia se sabe que por la zona norte de Navarra otro material que más abunda en las cavidades es la caliza., roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO₃).

Tomando las definiciones extraídas de la Memoria de la Cartografía Geológica de Navarra, hoja 90-IV, denominada Alkotz, [27]; tenemos que el conjunto de dolomías, pizarras y calizas esencialmente carbonatado del Carbonífero superior culmina mediante un tramo de mayor variabilidad litológica. Se trata de una sucesión alternativa de dolomías y calizas, en la que se intercalan tramos de predominio esquistoso y, a techo, calizas en bancos gruesos. El espesor alcanza los 120 m. El segundo tramo (correspondiente al nº 49) es la unidad paleozoica con mayor superficie de afloramiento, pudiendo realizarse buenas observaciones. Supone un importante cambio litológico y sedimentario con respecto al conjunto carbonatado Namuriense.

4.1.2. *Propiedades físicas de los materiales*

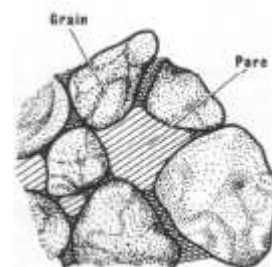
En este apartado se comentan algunas de las propiedades generales correspondientes a los materiales definidos en la sección anterior, que influyen en la morfología de la cueva. Y luego se hace hincapié en las propiedades eléctricas de estos, dado que las condiciones eléctricas de los materiales son necesarias a la hora de reconstruir el escenario y las que más influyen en la propagación de las ondas electromagnéticas.

Visto desde un plano físico general, una roca está constituida, tal y como se dice en [28], por:

-La matriz: La parte sólida constituida por los minerales que se concentran en ella, teniendo cada uno de ellos sus propias propiedades físicas (densidad, velocidad, resistividad,...).

-La porosidad: Volumen de los huecos existentes en la matriz, medido en porcentajes.

-Los fluidos: Lo que llena en mayor o menor medida los huecos de la matriz. Que puede ser agua más o menos salada, hidrocarburos, gases, aire,..., cada uno con las propiedades propias del fluido.



Algunos de estos parámetros pueden ser relacionados entre sí. Es el caso de la porosidad con la densidad y la velocidad sísmica. Si se tiene un material poco poroso, entonces ese mismo material será denso y tendrá una velocidad sísmica alta. Por tanto, sabiendo que un material es poroso entonces se pueden deducir varias propiedades dentro del mismo.

Estas propiedades trasladadas a las rocas más relevantes extraídas de los mapas geológicos del apartado anterior, dan una idea de qué tipo de materiales son.

Consultando diferentes fuentes bibliográficas se ha hecho una pequeña descripción de las dolomías y las calizas, en función de los parámetros mencionados anteriormente.

Los dos tipos de rocas pertenecen al grupo de rocas sedimentarias, por el origen de su formación. Examinándolas en conjunto tienen una porosidad baja entre 1 y 30% (según [28]) pero la filtración de agua por diaclasas y estratos, y la disolución que se produce al paso de esta, hace que se formen conductos, derivando en cuevas. La permeabilidad, es otro parámetro representativo de un material y que está relacionado con la porosidad de un material. La definición dice que la permeabilidad de una roca, es la capacidad que tiene de transmitir un fluido. Por tanto, los materiales analizados serán más permeables, cuando más porosos sean y cuando más grandes y conectados estén.

El entorno del escenario, como ya se ha podido ver, es de montaña, en el que existe un grado de humedad considerablemente alto, por lo que las cuevas serán húmedas. Y si se ha dicho que por las calizas y dolomías suele filtrarse el agua, puede considerarse que los poros estarán rellenos de agua mayoritariamente. Este es un dato importante a considerar en el estudio de las propiedades eléctricas, ya que influirá en mayor o menor medida el que las rocas estén rellenas de agua (dulce).

4.1.3. Propiedades eléctricas de los materiales

Entrando en propiedades eléctricas de los materiales, se tiene que tener en cuenta que los parámetros antes descritos influenciarán fuertemente en la búsqueda de los valores de las resistividades, conductividades y constantes dieléctricas. Pero además de los ya mencionados se tiene que tener en cuenta, por ejemplo, la temperatura a la que están las rocas, la frecuencia a la que se trabaje, la salinidad, tanto de la roca como la del agua en los poros, la anisotropía del material (en función del sentido de la inyección de corriente tiene un valor de resistividad diferente).

Como puede observarse las resistividades dependen de mucho factores, independientes entre sí, pero que condicionan la obtención de un valor exacto, por lo que el encontrar un valor apropiado equivalente a las propiedades eléctricas del entorno, no es algo trivial.

A continuación se dan una serie de definiciones de los conceptos de resistividad, conductividad y constante dieléctrica, particularizado a suelos y rocas.

Ciñéndose en la definición general de la resistividad se tiene que la resistividad eléctrica ρ de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad σ como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material. La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor. Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección s y longitud l la resistencia eléctrica es:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (4.1.1)$$

A partir de esta ecuación podemos despejar la resistividad:

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} \quad (4.1.2)$$

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro ($\Omega \cdot m$). La conductividad se define como el inverso de la resistividad

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4.1.3)$$

La unidad de conductividad en el Sistema Internacional es el siemens (S).

Si llevamos este término hacia el ámbito de suelos y rocas tenemos que la resistividad, según [29], es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales. La resistividad de las calizas y de las dolomías depende en gran medida de su estado de fisuración y del relleno de sus espacios dentro de la roca. Así, valores elevados de resistividad corresponden a rocas muy compactas con fracturas vacías o formaciones

impermeables, mientras que valores relativamente bajos corresponden a calizas muy fracturadas o con agua salada. En la generalidad de los casos las calizas resultan como un resistivo en relación a arcillas o margas. No cabe esperar que la resistividad de una especie mineralógica determinada pueda representarse por un dato único, sino que variará dentro de límites amplios.

La mayoría de los minerales pertenecen a los cuerpos dieléctricos o aisladores, como son el azufre, la blenda, la calcita, el cinabrio, el cuarzo, las micas y el petróleo entre otros. Además, entre estos minerales, además, figuran los más importantes constituyentes en las rocas, las cuales se comportarían como aisladoras si no fuera por la presencia de electrolitos. Por tanto, si la resistividad de las rocas dependiese únicamente de los minerales constituyentes, se debería considerar como aislantes en la inmensa mayoría de los casos, puesto que el cuarzo, los silicatos, la calcita, las sales, etc., lo son prácticamente. Sólo en el caso de que la roca contuviese minerales semiconductores en cantidad apreciable, podría considerarse como conductora [29].

A continuación se muestra una tabla con ejemplos de los rangos de resistividades para diferentes tipos de rocas [30].



Figura 4.4. Valores de resistividad de diferentes rocas y minerales (Orellana, 1982) [30].

La resistividad de las rocas también depende de la temperatura a la que se encuentre, ya que la temperatura influye notablemente en la resistividad de los fluidos que hay en los poros. En concreto, un descenso de la temperatura provoca que los poros con agua se enfríen o congelen y agranden la resistividad, a temperaturas más altas pasa lo contrario.

Cabe mencionar que la resistividad de algunos minerales, y como consecuencia de las rocas que estos forman, varía según la dirección de la corriente en la toma de medidas, es decir, que presentan anisotropía. La formación de estratos puede producir anisotropía, caso de las rocas sedimentarias. En general este efecto será débil dada la aleatoriedad de las orientaciones de los minerales en la roca y sobre todo por la amplia diversidad de parámetros que hay que tener en cuenta a la vez.

El que haya diferentes grados de humedad para el mismo terreno da lugar a resistividades diferentes. Además dependiendo de la época del año habrá más concentración de agua en la cavidad, tanto por la humedad como por la filtración de agua a través de la roca.

Esto puede llevar a interpretaciones muy variables entre sí, y dependiendo de la frecuencia de trabajo puede que el resultado en la propagación de las ondas dé un comportamiento inesperado.

Roches	Porosité totale (%)	Perméabilité (cm/s)	Résistivité (ohms·m)
Argilite	35	10^{-8} - 10^{-9}	70 à 200
Craie	35	10^{-5}	30 à 300
Tuf volcanique	32	10^{-5}	20 à 300
Marnes	27	10^{-7} - 10^{-9}	20 à 100
Grès	3 à 35	10^{-3} - 10^{-6}	30 à 800
Dolomite	1 à 12	10^{-5} - 10^{-7}	200 à 10'000
Calcaires	3	10^{-10} - 10^{-12}	200 à 10'000
Métaschistes	2.5	10^{-4} - 10^{-9}	300 à 800
Gneiss	1.5	10^{-8}	1'000 à 20'000
Quartzite	<1	10^{-10}	1'000 à 10'000
Granite	1	10^{-9} - 10^{-10}	1'000 à 15'000
Gabbro	1 à 3	10^{-4} - 10^{-9}	6'000 à 10'000
Basalte	1.5	10^{-6} - 10^{-8}	800 à 15'000

Figura 4.5. Valores de porosidades, permeabilidades y resistividades. [28]

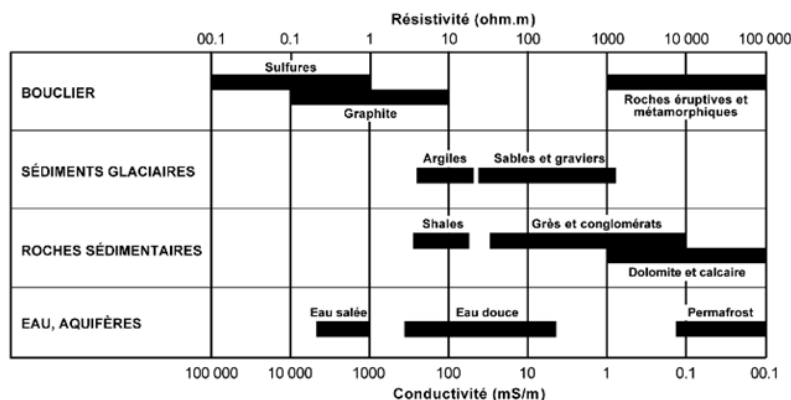


Figura 4.6. Rangos de resistividades y conductividades en distintos tipos de materiales. [28]

Los datos que aparecen en algunas de las siguientes tablas de constantes, obtenidos de muestras cuidadosamente escogidas y descatadas, no son relevantes para este caso. Interesan los valores de las rocas y minerales, tal y como se encuentran en la naturaleza, con sus impurezas, fisuras, diaclasas, humedad, etc. Las calizas presentan resistividades comprendidas generalmente entre 10^2 y $5 \cdot 10^3$ Ohmios·m. Valores semejantes presentan las areniscas y dolomías.

La permitividad o constante dieléctrica es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. Viene definida con respecto a la del vacío ϵ_0 que es $8,854188 \cdot 10^{-12}$ F/m. Aunque normalmente para definir un material se da la permitividad relativa ϵ_r , o también llamada constante dieléctrica.

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (3.1.4)$$

La constante dieléctrica o permitividad relativa de las rocas tiene también valores en función de la de sus componentes, de la proporción de éstos, y de su modo de agruparse. La presencia de agua influye notablemente, por la elevada permitividad relativa de ésta (81.43). La falta de fórmulas teóricas para el cálculo de la constante dieléctrica en función de los parámetros externos, hace que se preste mayor interés a las determinaciones experimentales de la permitividad de las rocas. En [30], los valores de permitividad de las calizas y las dolomías se consideran 75/90 pF/m y 100 pF/m respectivamente. Si se pasa a valores de permitividad relativa se tiene que las calizas rondan los valores de 8.47-10.16 y las dolomías 11.29.

Pero el objetivo de este trabajo no es dar una interpretación de los materiales constituyentes a partir de las resistividades aparentes obtenidas, sino buscar un valor que nos muestre en simulación un comportamiento similar al que se vaya a medir in situ. Por tanto, en la búsqueda de las propiedades eléctricas de los materiales, será de mayor importancia buscar valores en las frecuencias a las que se va a trabajar.

En este caso en concreto, ha sido a 2.4 GHz. Difícilmente se han encontrado valores a la frecuencia exacta, muchas eran analizadas a frecuencias más bajas. Puede que las razones de esto, fuera que en la mayoría de las veces las medidas eran trabajos de geofísica buscando la resistividad de la tierra y que a bajas frecuencias (longitudes de ondas grandes) las ondas penetran más.

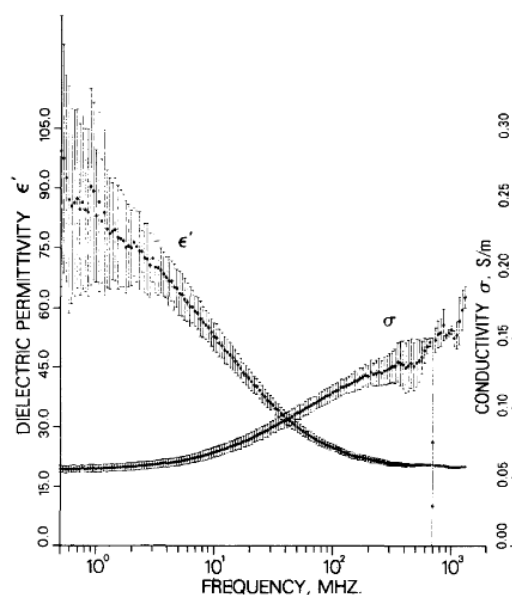


Figura 4.7. Gráfica de conductividad y constante dieléctrica de una muestra en Whitestone, en función de la frecuencia. [33].

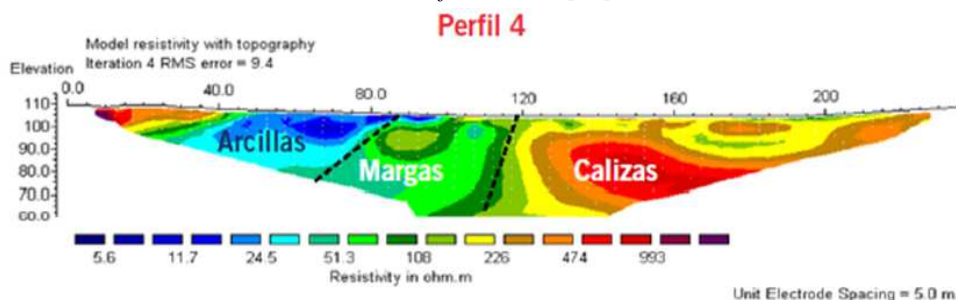


Figura 4.8. Ejemplo de un perfil de un trabajo típico de prospección geofísica de la tierra con distintos materiales, sus resistividades representadas en escala de colores. Imagen tomada de la empresa Wide World de Barakaldo. Perfil en Miribilla (Bilbao)

4.1.4. Lista de resistividades, conductividades y constantes dieléctricas.

Después de una ardua búsqueda de los parámetros que más se asemejasen a las condiciones de la ladera de Aierdi, se decidió realizar un listado de los datos recogidos más representativos y deducir un valor para caracterizar la cueva.

A continuación se da una tabla de valores de conductividades y resistividades de los materiales que más interesaban, que han sido recogidas en distintas fuentes referenciadas.

Material	Detalle	Conductividad (S/m)	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
Calizas y Areniscas ³⁰		0.005 - 0.0001	200 – 10000
Limestone ²⁸		0.0125 - 0.00005	80 – 20000
Dolomite ²⁸		0.005 - 0.00005	200 – 20000
Eau mediocre ²⁸		0.1666	6
Calizas y Dolomías ²⁸		0.005 - 0.0001	200 – 10000
Calcaires ²⁸		0.005 - 0.001667	200 – 600
Dolomite et Calcaires ²⁸		0.001 - 0.00001	1000 – 100000
Slates ³¹		0.001667 - $2.5 \cdot 10^{-8}$	600 – $4 \cdot 10^7$
Limestone ³¹		0.02 - 10^7	50 – 10^7
Dolomite ³¹		0.00285 – 0.0002	350 – 5000
Schists ³¹		0.05 – 0.0001	20 – 10000
Dolomite ³¹	1% H_2O	0.00016	6000
Dolomite ³¹	1.5 % H_2O	0.000125	8000
Calizas ³²		0.00333 – 0.0001	300 – 10000
Esquistos ³²		0.00333 – 0.000333	300 – 3000
Calizas/Areniscas ³²		0.02 – 0.000333	50 – 3000
Pizarras ³²		0.02 – 0.00333	50 – 300
Pizarras ³²		0.1 – 0.002	10 – 50
Caliza porosa ³²		0.001 – 0.00333	100 – 3000
Calcite rock ³³	f (1GHz)	0.15	6.667

Tabla1. Tabla de rangos de conductividades y resistividades recogidas en distintas fuentes.

Observando la variabilidad que existe en este parámetro, se toma la decisión de definir un rango en función de lo recogido, definiéndolo en tres valores: mínimo, máximo y medio. Los valores limítrofes se toman a partir de la definición en el artículo [34], donde se clasifican los suelos para trabajar con radares para aplicaciones de arqueología.

En la siguiente figura, [34] representa la dependencia de la velocidad de propagación de la onda con la frecuencia de emisión. Se representan 3 casos de conductividades distintas dentro de los medios definidos como conductividad baja, con una permitividad dieléctrica relativa de 10, valor aproximado correspondiente a diversos suelos como, arcillas secas, mármol, etc.

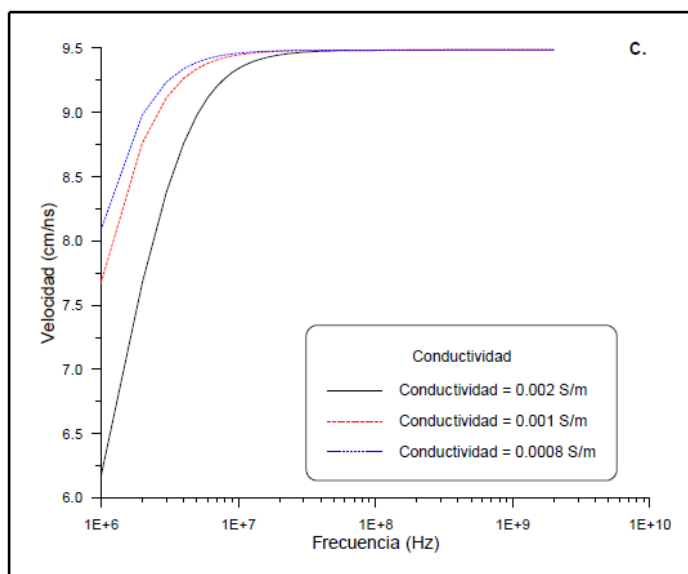


Figura 4.9. Variación de la velocidad con la frecuencia en el rango de frecuencias de trabajo de un georradar para un medio con $\epsilon_r = 10$. [34]

Dentro de los materiales que considera resistivos se encuentran las gravas saturadas, las calizas húmedas y las arcillas secas (10mS/m). Y tal y como se dice en [30], en este mismo grupo se encuentra el agua dulce (entre 10mS/m y 0.1mS/m). Si se tiene en cuenta los detalles descritos en los párrafos anteriores, tenemos que los materiales, normalmente se mezclan y contienen impurezas. Por tanto, el abanico de valores de conductividades se define entre los límites de 0.1mS/m a 10mS/m. A estos valores se les añade un término medio de forma que se tenga una evolución un poco más escalonada.

Material	Conductividad (S/m)
Dolomías y Calizas (mínimo)	0.0001
Dolomías y Calizas (medio)	0.005
Dolomías y Calizas (máximo)	0.01

Tabla 2. Valores de conductividades elegidos.

Pero además de estos valores, la caracterización de un material se hace definiendo también un valor de permitividad relativa o también llamada constante dieléctrica. El hecho de que se haya definido distintos valores de conductividades da una idea de que el medio es cambiante, según su composición o según la meteorología. El que el entorno sea una cueva significa que es un medio muy húmedo y que a veces contendrá gran cantidad de agua dependiendo de las precipitaciones. Además se sabe que los valores cambian en función de la frecuencia de trabajo.

En la figura 4.7. se observa que conforme la frecuencia de trabajo aumenta los valores de permitividad relativa convergen hacia un valor. El que se haya definido tres valores de conductividad diferentes puede interpretarse como que la roca tiene diferentes valores de proporción de agua siendo el material más conductivo el que tiene porcentaje más alto. Esto también influirá a la hora de elegir un valor de conductividad. En la siguiente figura puede verse como la constante dieléctrica depende de la porosidad que tiene la calcita y por defecto, la concentración de agua que puede existir en los poros.

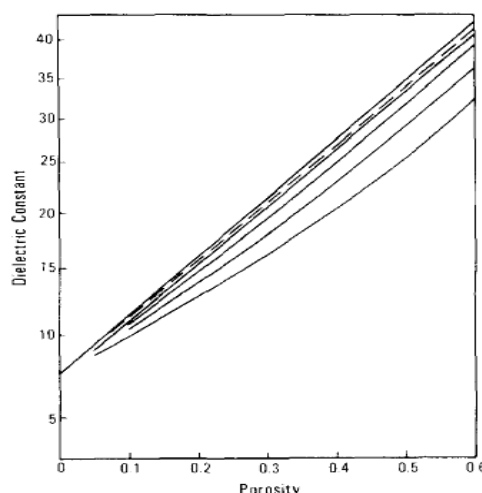


Figura 4.10. Representación de la dependencia de la constante dieléctrica con la porosidad en las rocas. Rocas saturadas con agua y ácido clorhídrico. [33]

Siguiendo el mismo criterio, la definición de la constante dieléctrica se ha hecho en tres valores diferentes, teniendo en cuenta la distinta concentración de agua en los poros.

Mediante la siguiente tabla, de [35], se han extraído los valores de referencia, que aunque sean valores para la frecuencia de 1.5 GHz, al saber que los valores convergen hacia un valor conforme se crece en frecuencia, se deduce que los valores serán parecidos para 2.4GHz.

Material	Typical Dielectric Constant	Radar Propagation Velocity
Air	1	0.30 m/ns
Water	81	0.033 m/ns
Limestone	6	0.12 m/ns
Dolomite	6.8 -8	0.10 – 0.80 m/ns
Dry Clay	8	0.11 m/ns
Wet Clay	33	0.052 m/ns
Rocks	4-12	0.15 – 0.087 m/ns

Figura 4.11. Tabla de valores de distintos tipos de materiales y rocas con sus valores de permitividad relativa correspondiente. [35]

Por tanto, los valores de permitividad dieléctrica definidos, para cada valor de conductividades, son los siguientes:

Material	Conductividad (S/m)	ϵ_r
Dolomías y Calizas (mínimo)	0.0001	6
Dolomías y Calizas (medio)	0.005	7.5
Dolomías y Calizas (máximo)	0.01	10

Tabla 3. Valores de conductividades y constantes dieléctricas elegidos.

4.2. Medida del escenario

El escenario a medir, como ya se ha comentado en capítulos anteriores, es la cueva de Aierdi-VIII, situada en la ladera del mismo nombre, que pertenece al municipio de Lantz, Navarra.

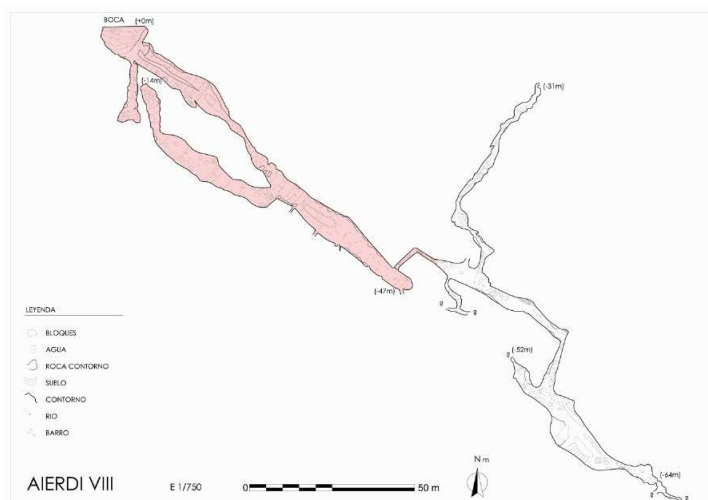


Figura 4.12. Mapa topográfico cueva Aierdi-VIII. Área de estudio marcada en rojo. G.E.Satorrak

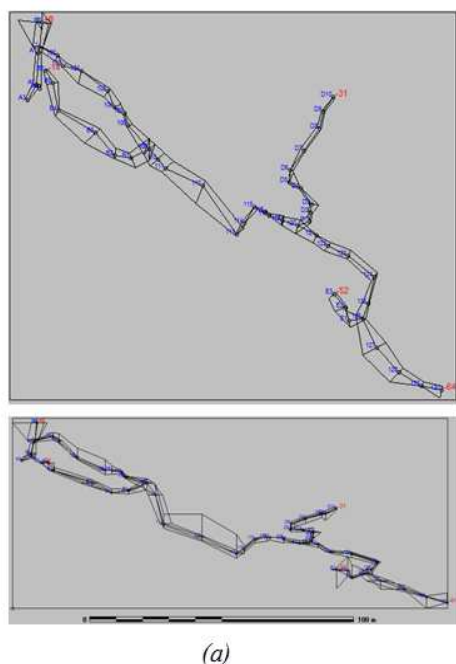
Para este trabajo, aprovechando los conocimientos adquiridos en prácticas realizadas con el G.E.S. (Grupo Espeleología Satorrak), se realizó una topografía completa de la cueva, como puede verse en la figura 27. Para el trabajo desarrollado se escogió la zona más cercana a la entrada (marcada en rojo) como primer paso a la recreación del escenario. Para la topografía se utilizaron herramientas típicas de topografía, como brújulas de mano, clinómetros y cintas métricas, y herramientas un poco más desarrolladas, como el Láser Disto A3 de Leica, para medir distancias, con la incorporación externa de las funcionalidades de rumbo e inclinación (ver figura 28).



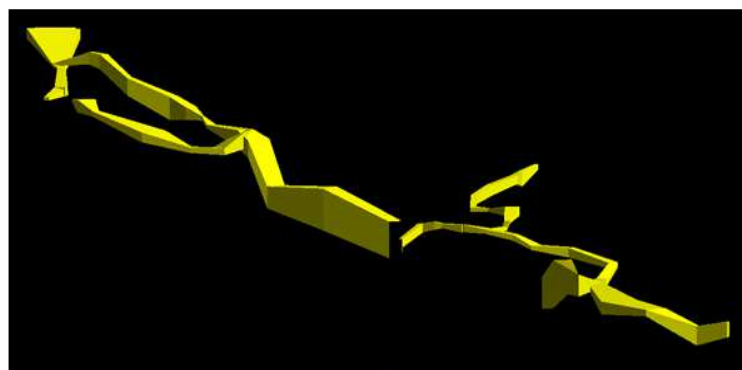
Figura 4.13. Material imprescindible para la realización de topografía espeleológica.
 Foto: Jose Antonio Sarratea (G.E.Satorrak)

Realizar la topografía de una cueva, resulta una acción muy metódica y meticulosa, puesto que la recogida de datos se realiza de forma ordenada y son necesarias como mínimo dos personas. Los datos se van apuntando a mano en una libreta, a medida que se va avanzando por la cueva. Y a medida que el primer compañero va tomando puntos característicos de referencia (utilizando piedras, estalactitas,...) y midiendo alturas y anchuras en ese punto, se los va “cantando” al compañero (situado un punto más atrás) que es el que apunta los datos en la libreta.

Una vez realizada la labor de campo, todas las medidas se registraron en un programa llamado Visual Topo, una herramienta software libre, hecha expresamente para la topografía espeleológica. Los resultados que se obtienen de este software pueden amoldarse a las necesidades de cada uno. En este caso se sacaron, plantas, perfiles y una representación en 3D de la cueva como puede verse en la figuras 4.14a y 4.14b.



(a)



(b)

Figura 4.14. (a) Planta y perfil de Aierdi-VIII. (b) Visualización 3D de la cueva Aierdi VIII.
 Datos obtenidos del software Visual Topo

Antes de comenzar con este proyecto, ya se había hecho parte de la topografía y mediante esta herramienta se mostró el escenario elegido, para que tanto el tutor como los colaboradores del proyecto dieran el visto bueno. Una vez puesto en marcha el proyecto, se necesitaron varias medidas topográficas más, para completar la cueva.

Pasando a la descripción morfológica de la cueva, de esta se puede comentar que tiene un desarrollo de más de 260 m, de los que los primeros 150 m corresponden a la zona escogida para el estudio. Se desarrolla con orientación ESE (Este Sudeste) y llega hasta una profundidad de -64 m, aunque el área de estudio baja hasta -45m.

El área en la que se centra el estudio, presenta galerías amplias, tanto en anchura como en altura, comparando con las que se pueden encontrar más adentro. La existencia de espeleotemas es importante, lo que denota filtración de agua y dependiendo de la época del año se puede apreciar la aparición de riachuelos o *gours* llenos de agua. Esto la define como una cueva activa.



Figura 4.15. Fotografías de la galería principal. G. E. Satorrak

4.3. Recreación del escenario

4.3.1. Descripción del software utilizado.

Una vez que se tiene el escenario medido, el siguiente paso es el de recrearlo en el software de trazado de rayos en 3D. Para ello, se ha utilizado Matlab y su lenguaje de programación, con la finalidad de poder ser utilizado como simulador de propagación de ondas en espacios interiores. Las funciones diseñadas han sido desarrolladas íntegramente en la Universidad Pública de Navarra.

El método de trazado de rayos 3D que se ha utilizado, se basa en el algoritmo de Ray Launching, que consiste en la distribución espacial uniforme, a partir de un trasmisor, de un número finito de rayos, con los que se pretende modelar la propagación de los frentes de ondas,

así como su interacción con el entorno. Por tanto tiene en cuenta reflexiones y refracciones de los rayos en el espacio cerrado donde se realiza la simulación.

Dentro del escenario todas las formas se componen mediante cuboides, ya sean galerías redondas, ovaladas o cuadradas. Esto supone un gran reto puesto que prácticamente nada es recto y plano en una cueva, pero le otorga una mayor simplicidad a la hora de la construcción. Las cavidades pueden considerarse los lugares más irregulares de la naturaleza a simple vista, pero con paciencia y dedicación ha sido posible llegar a una aproximación de la cueva, teniendo en cuenta que se perderán detalles, y muchos obstáculos no se representarán.

Trabajos como los ya mencionados [10] y [11], utilizan aproximaciones matemáticas para introducir a cada cuboide, coeficientes de reflexión y de rugosidad en las paredes. Pero en este trabajo sólo se tiene en cuenta las características del material, definiendo valores de conductividad y constante dieléctrica, como ya se ha comentado en el capítulo anterior.

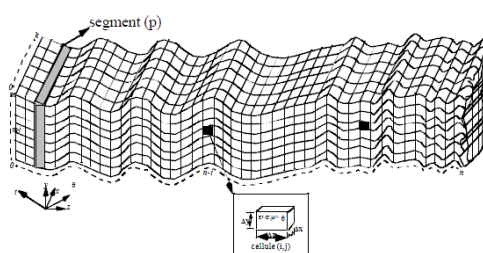


Figura 4.16. Representación geométrica discreta de una galería minera definiendo en cada cuboide coeficientes de reflexión, difracción, rugosidad, etc. [10]

Como resultado se obtienen datos como la potencia recibida en cada punto de la sala y la cantidad de datos dependerá de la resolución. Éste también es un parámetro que se puede modificar dependiendo de las zonas de interés. A mayor interés de la zona, se pondrá una mayor resolución y se extraerán una mayor cantidad de datos de esa zona. En este caso en particular se han utilizado los 5 primeros rebotes de los rayos para conseguir cierta precisión. Según incrementa este número, aumenta el tiempo de cálculo, simulación y requerimiento computacional. Aunque estos factores también variarán dependiendo de otros parámetros como por ejemplo el tamaño del recinto en cuestión, que en el caso de la cueva es de dimensiones considerables si lo comparamos con una habitación. Es necesario llegar a una solución de compromiso entre las dimensiones de los cubos, la resolución que se quiere y que los resultados se asemejen lo más posible a lo que se daría en la realidad.

En el mismo software se especifica el tipo de antena o antenas que se utilizarán y sus parámetros (frecuencia, directividad, etc.).

Una de las ventajas que tiene el código, es que muestra una buena aproximación a un coste computacional relativamente bajo.

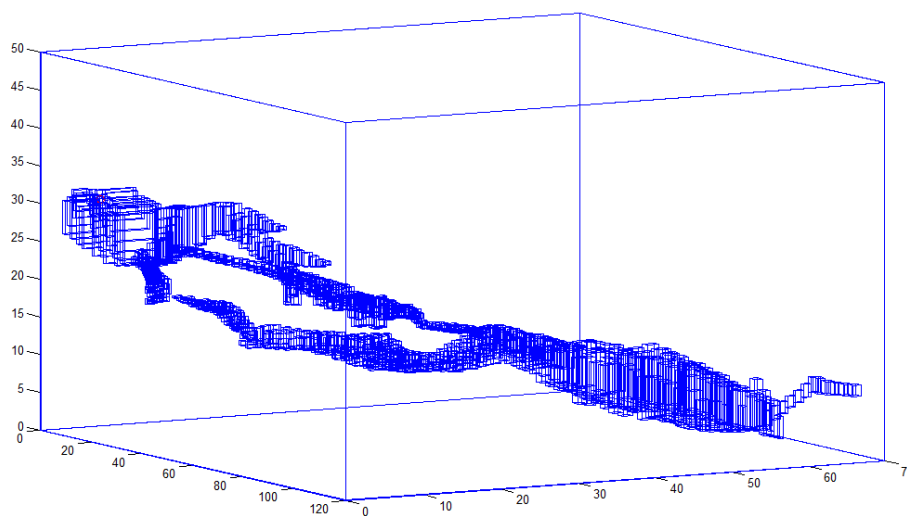
4.3.2. Construcción del escenario.

A continuación se describe el proceso de construcción del escenario. Como se ha podido ver anteriormente se ha elaborado la topografía de la cueva, utilizando otra herramienta software, llamada Visual Topo. Tomando estas dos representaciones como referencia se ha reconstruido cuboide a cuboide un escenario de dimensiones 120x70x50 metros.

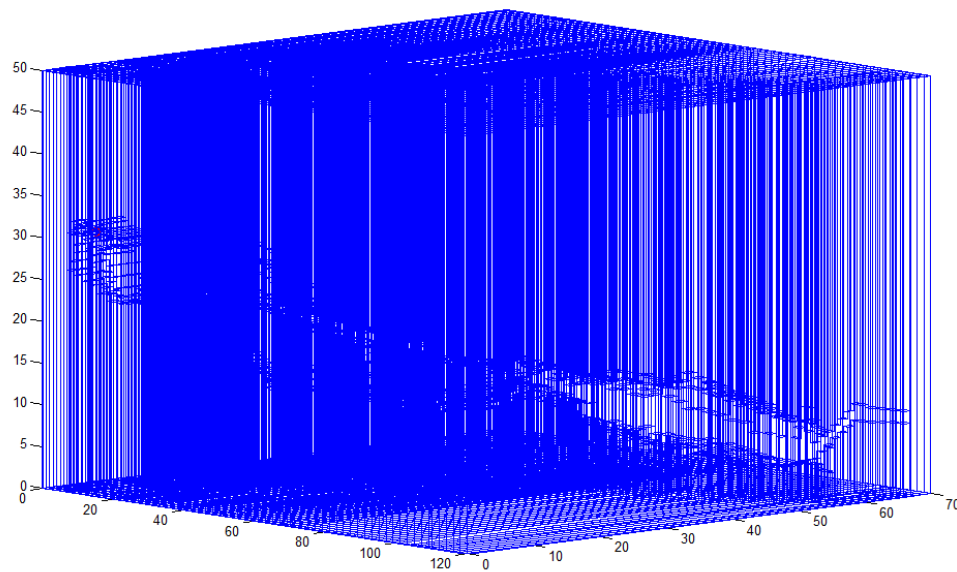
Sin embargo, para empezar a construirlo surgieron algunas dudas respecto a la forma de generarlo, ya que, nunca antes se había hecho un escenario de estas dimensiones y características. Se plantearon dos variantes: hacerla por tramos definiendo pequeñas habitaciones y luego juntarlas o hacerlo todo en una misma habitación. Se eligió la segunda opción porque de por sí, el escenario tiene una complejidad bastante alta y el que se simule en distintas “habitaciones” y el programa se encargue de juntarlas añade un coste computacional mayor. Así, utilizando las medidas de Visual Topo se fue recreando la cueva.

El siguiente problema con el que tuvo que hacerse frente, fue que el código no da la posibilidad de introducir antenas dentro de un cuboide. Por tanto se replanteó el que se representase la cueva en cuboides. La solución que se planteó fue rellenar la habitación entera de cuboides menos lo que definía a la cueva, de esta forma la cueva quedaba hueca (aire) y todo lo de alrededor estaría definido como roca.

Para llevar esta idea adelante, se decidió seguir desarrollando un código para fabricar cuboides definiendo la cueva y a partir de este código crear una función, que fabricase cuboides alrededor, en función de los ya definidos. Lo que a simple vista puede parecer sencillo, el que galerías se crucen una encima de la otra, el que existan galerías a la misma altura, etc., complica y mucho la elaboración de un código sin que dé lugar a errores. Para entenderlo mejor, a continuación se pueden ver los resultados de los dos códigos. En el primero tenemos que todo el escenario está definido como aire y los cubos representan la cueva. En cambio en el segundo, añadiéndole una función al primer código, se consigue que todo el escenario esté lleno de cubos menos la cueva (aire).



(a)



(b)

Figura 4.17. Representación de la cueva en Matlab mediante cuboides. (a) Escenario de todo aire menos los cuboides de la cueva. (b) Escenario de todo cuboides menos la cueva (aire).

El que se haya definido todo el escenario como roca añade un punto positivo ya que este le aporta más realismo al escenario, y se puede medir el grado de penetración en la roca.

Para llegar a este punto, primero se ha tenido que tener en cuenta la forma simplificada que aporta Visual Topo, con formas poligonales de la cueva y luego se ha pasado a los planos topográficos que son los que aportan los detalles. Siguiendo esta evolución se ha conseguido llegar a una representación de la cueva mediante cuboides en Matlab.

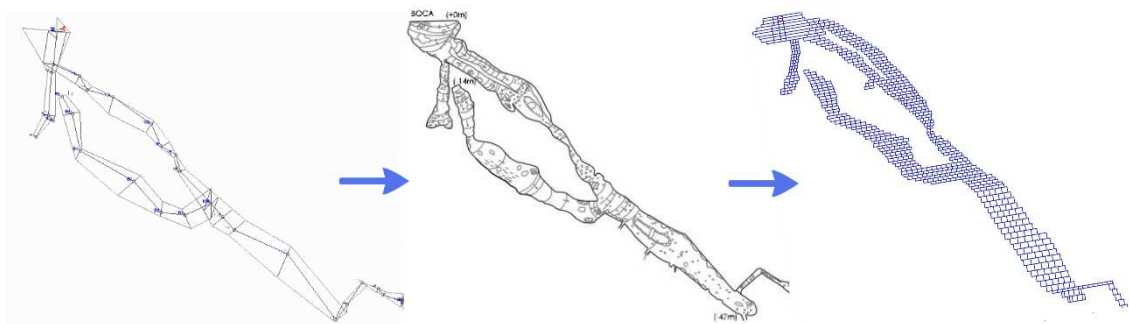


Figura 4.18. Evolución de la construcción del escenario

4.4. Resultados I. Simulaciones

Es necesario destacar que estas primeras simulaciones corresponden a un estado en el que estaban definidas solamente algunas galerías y que se hicieron simulando los cubos con material de hormigón. La razón de esto es que el orden cronológico del trabajo fue distinto al que se expone en este documento, por lo que los materiales y sus características se definieron conforme se avanzaba en proyecto. Por tanto los resultados expuestos corresponden a una primera aproximación a la realidad de la cueva.

4.4.1. Escenario I

En estas primeras simulaciones la antena transmisora, es una fuente isotrópica como todas las que se pondrán de aquí en adelante, emite a 2.4GHz y a 1Watt de potencia o lo que es lo mismo a 30dBm. Está colocada justo en la boca de la cueva, y lo que se pretende con estas simulaciones es ver un comportamiento inicial y buscar la convergencia del código. Esto consiste en buscar una correcta interpretación de los resultados, ya que al tener resoluciones altas (cuboides receptores pequeños) en ocasiones estos cuboides receptores no capturan todos los rayos que deberían, por eso, se definirán distintas resoluciones para la ver la captura de potencia de los rayos emitidos.

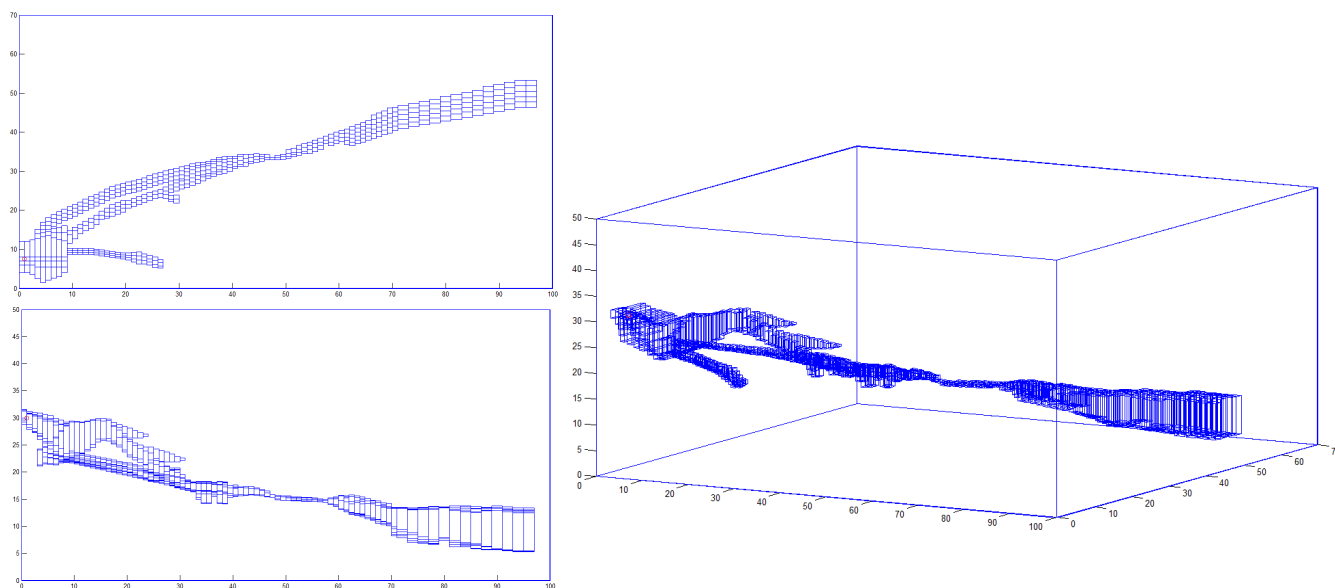


Figura 4.19. Planta, perfil y perspectiva del primer escenario simulado.

Para los siguientes resultados se ha cogido una altura fija común para todas las resoluciones: $Z=30\text{m}$ (altura en la que se encuentra la antena), sacando el plano correspondiente a los ejes XY.

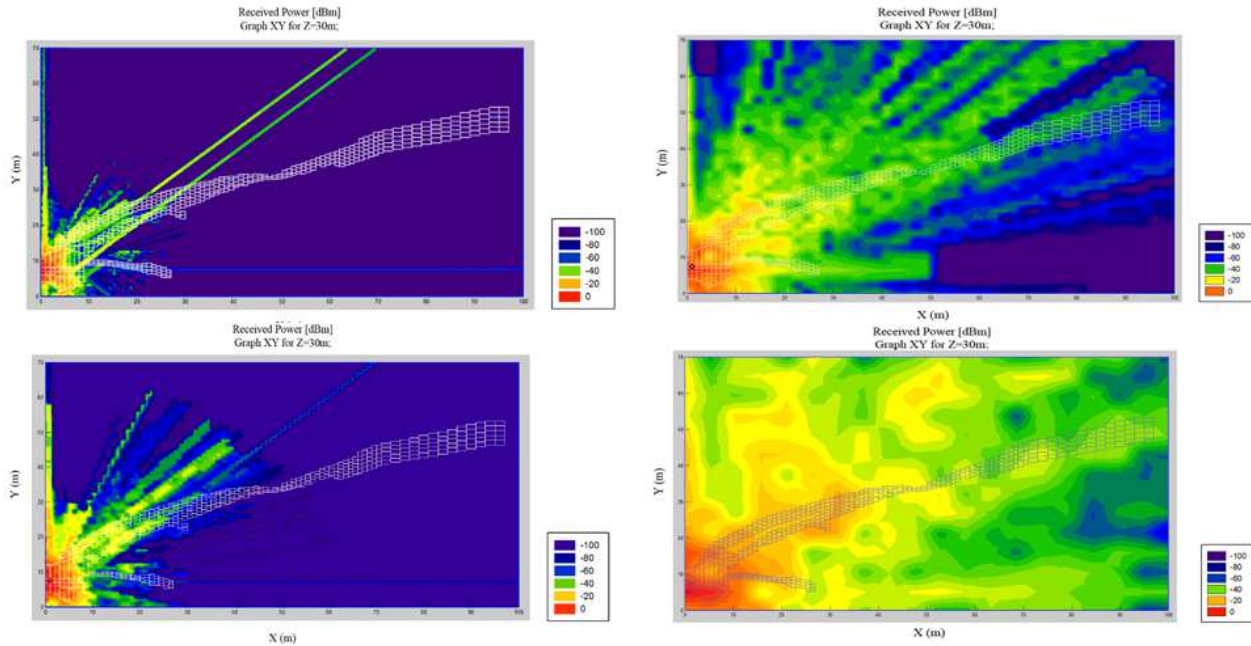


Figura 4.20. Resultados en planta, a la altura de la antena y a distintas resoluciones.

Las distintas gráficas corresponden a unas resoluciones de 0.5m, 1m, 2m y 5m respectivamente. La razón de simular a resoluciones bajas es para que el programa detecte todos los cubos y tenga en cuenta la potencia que llega a cada cuboide de la cueva, dado que el simulador no representa los rayos sino que calcula vectores de potencia. Esto, en ocasiones, puede llevar a una mala interpretación del escenario. Por tanto, lo que se busca es el punto de convergencia entre la resolución y la buena interpretación de la cueva. Esto mismo está representado en la figura 4.21., en la que se distinguen diferencias entre las distintas resoluciones para un mismo plano. Una vez se consiga el punto de convergencia, se podrá simular variando parámetros como la conductividad, permitividad relativa, etc.

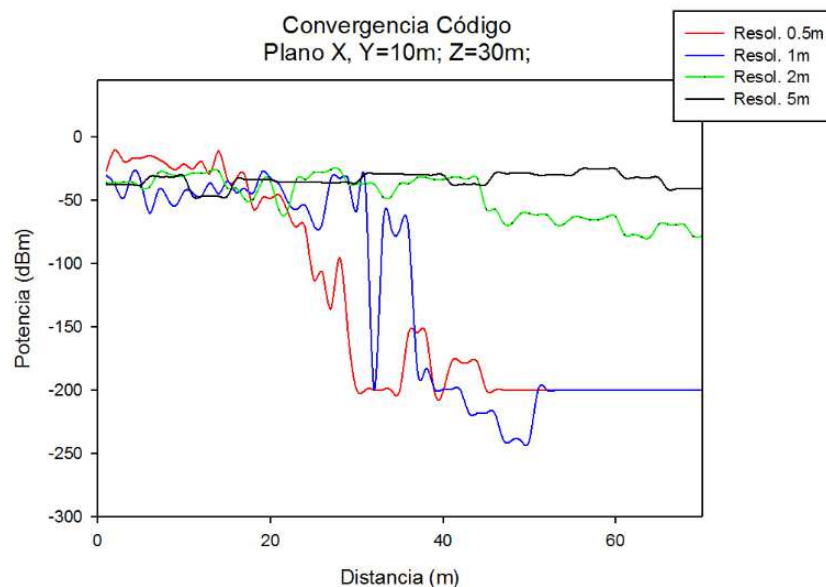


Figura 4.21 Representación de los valores de potencia, para un mismo plano ($Y=10m$; $Z=30m$), con distintos valores de resolución.

A modo de visualización, a continuación se muestran los perfiles XZ aproximadamente en la línea de la antena y que corresponden a resoluciones de 2 y 5m.

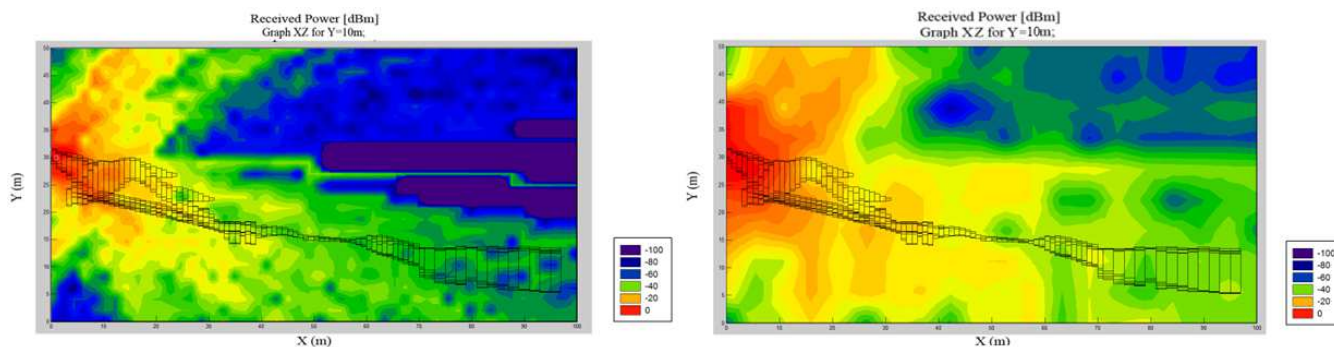


Figura 4.22 Resultados en perfil, a la altura de la antena y a resoluciones de 2 y 5m.

En la imagen izquierda puede apreciarse, desde la zona central hasta el margen derecho, una interpretación distinta a la imagen de la derecha, los niveles de potencia son distintos.

4.5. Medidas en la cueva

Mientras se iba perfeccionando el escenario y buscando las características de los materiales, paralelamente se planificaron las medidas en la cueva. Días antes a las mediciones, se hizo una reunión con los planos de la cueva y señalando los puntos más interesantes de medición además de definir frecuencias, tipos de medidas, etc.

Por seguridad de los integrantes del grupo y sobre todo de los equipos de medida se contó con la ayuda del G.E. Satorrak, que se ofrecieron voluntariamente a acompañar al grupo de la UPNA.

Antes de comenzar a describir las medidas realizadas se va hacer una breve descripción de los equipos que fueron necesarios para la misma.

4.5.1. Descripción de equipos y características.

Los equipos se pueden distinguir dependiendo de su función. Por una parte están los equipos para las medidas de potencia recibida o RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) y por otro los equipos para las medidas de PER (*Packet Error Rate*).

Para las medidas de RSSI, la función de generador de señal la cumplía un analizador de espectros Agilent CSA Spectrum Analyzer N 1996A emitiendo a una frecuencia de 2.4GHz y a una potencia de -10dBm (única opción) (Figura 4.23a). A este se le conectaba, mediante un cable, una antena RS ECOM5-2400 de 2.4GHz para transmitir (Fig. 4.23b).



(a)



(b)

Figura 4.23. (a) Agilent CSA Spectrum Analyzer N 1996A utilizado como generador. (b) Antena RS ECOM5-2400 de 2.4GHz.

Para la parte de recepción se utilizó la misma antena conectada a otro analizador de espectros móvil, concretamente el analizador RF Field Fox N9912A que se muestra en la figura 4.24.



Figura 4.24. (a) Analizador RF Field Fox N9912A utilizado para recepción.

Tanto para la antena transmisora como para la receptora se utilizaron trípodes, uno como el de la imagen y otro de tamaño más reducido, utilizado para las cámaras fotográficas. Y por supuesto, se hizo uso de una cinta métrica.



Figura 4.25. Leica GST20-9 Wooden Telescopic Tripod

Estos son los equipos correspondientes a las medidas de potencia RSSI, los equipos utilizados para la medición de PER, fueron los siguientes:

Para la parte de comunicación se utilizaron XBee-Pro (fig. 4.26), módulos de radiofrecuencia basados en IEEE 802.15.4 de la compañía Digi International. Fueron diseñados para redes de sensores de bajo coste y bajo consumo. A continuación se señalan las características más relevantes de estos dispositivos.



Figura 4.26. Módulo XBee-Pro.

- Frecuencia de operación: Banda ISM 2.4 GHz.
- Alcance en entornos interiores o urbanos: 300 metros.
- Alcance en entornos exteriores con línea de visión despejada: 1.600 m.
- Potencia transmitida máxima: 18 dBm (63 mW).
- Sensibilidad: -100 dBm.
- Máxima tasa de datos: 250 Kbps.
- Posibilidad de usar retransmisiones y ACKs.
- Comunicación unicast y broadcast.
- Modo de comunicación Non-beacon (sin tramas piloto).
- Soporta topologías en malla, árbol y estrella.
- Bajo consumo de energía:
- Pico de corriente en transmisión: 250 mA.
- Mínimo consumo de corriente en recepción (Idle): 55 mA.
- Están optimizados para su uso en EEUU, Canadá, Australia, Japón y Europa.

Para la configuración y manipulación de los parámetros de emisión y recepción se contó con dos ordenadores portátiles a los que se les instaló un programa en JAVA. Este programa, además de leer los valores de RSSI, tiene la opción de leer el PER. En la figura 4.27 se ve la opción de PER activada (en azul).



Figura 4.27. Programa en Java para la lectura del PER.

Tanto para transmisión como para recepción, se utilizó el mismo programa, ya que dispone de una opción para analizar el PER introduciendo la dirección de destino de los paquetes y el número de paquetes a transmitir.

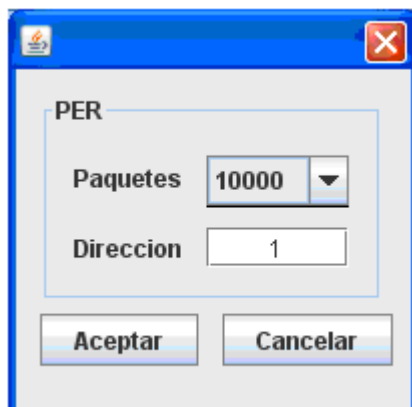


Figura 4.28. Programa en Java para el envío de paquetes en el caso del PER.

El número de paquetes a transmitir sólo puede ser uno de los valores que aparecen en la lista desplegable, aunque esta lista puede ser modificada si es necesario.

4.5.2. Medidas realizadas en la cueva de Aierdi VIII.

Una vez analizados los equipos y el escenario a medir, el siguiente paso es explicar el desarrollo de las medidas.

Las medidas se dividieron en dos partes: Radiales para la medición de potencia (RSSI) y mediciones de PER.

4.5.2.1. Radiales y mediciones de potencia

Mediante el análisis previo de los planos de la cueva, se definieron tres zonas, de las cuales dos fueron medidas (ver figura 4.29). Se empezó por zona más grande (zona 1), donde se colocó una antena en una posición fija prácticamente al final de la galería (punto marcado). Se hizo una radial metro a metro en dirección NO, hacia la boca, tomando el nivel de potencia en cada punto.

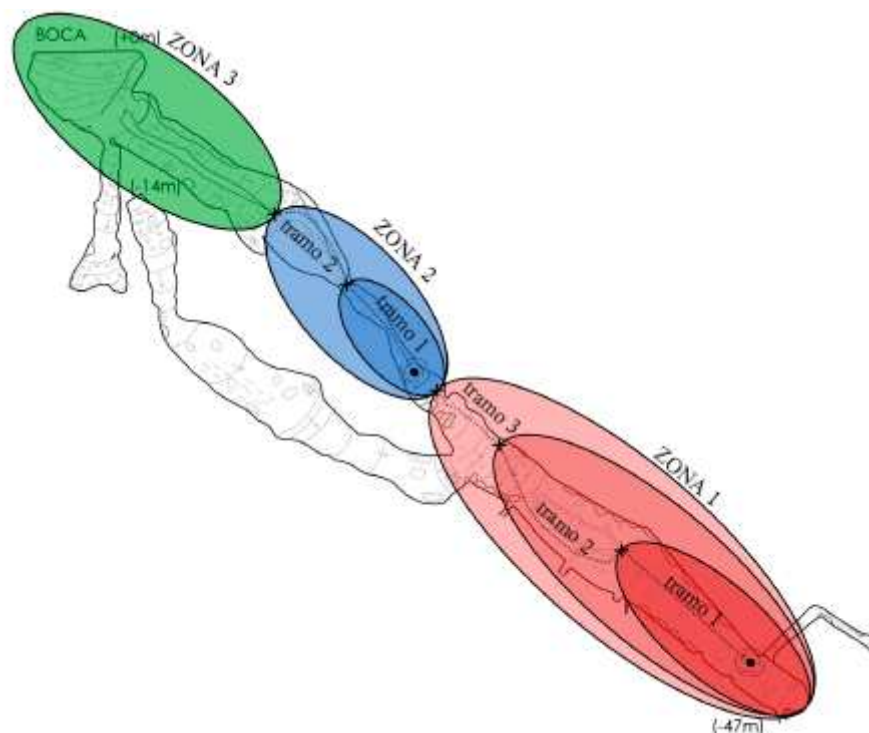


Figura 4.29. Representación de las zonas definidas en las medidas.

Dada la irregularidad de la galería y del terreno, la radial no tomó una dirección fija sino que tuvo que amoldarse a las condiciones morfológicas. Durante los primeros 20 metros aproximadamente, se tomaron los datos en línea recta, pero llegados a este punto tuvo que desplazarse lateralmente hacia la izquierda y continuar así durante otros 20 metros, bordeando los pozos existentes en la zona central. Como se aprecia en la fotografía 4.30., este tramo es escalonado y en algunos momentos se pudo perder la visión directa con el transmisor. Después, se consiguió avanzar otros 10 metros más, teniendo visión directa, hasta que se perdió la señal o esta ya era muy débil y se confundía con ruido. Este tramo también es escalonado, pero más suave que el anterior, no tiene pozo en medio y es el que da acceso a la zona 2 (el estrechamiento).



Figura 4.30 Fotografía tomada en la galería Grande en el tramo más escalonado. G.E. Satorrak



Figura 4.31. Fotografía tomada en la galería Grande tomando datos con la antena y el analizador de espectros portable. G.E. Satorrak

Se consiguió hacer un enlace total de 50 metros a 2.4 GHz y emitiendo -10dBm de potencia. En la gráfica se puede ver con detalle todos los puntos obtenidos y sus correspondientes valores de potencia. En todas las mediciones se consideró ruido a partir de los -100dBm, ya que la sensibilidad de los módulos Xbee-Pro indicaba el máximo en ese punto.

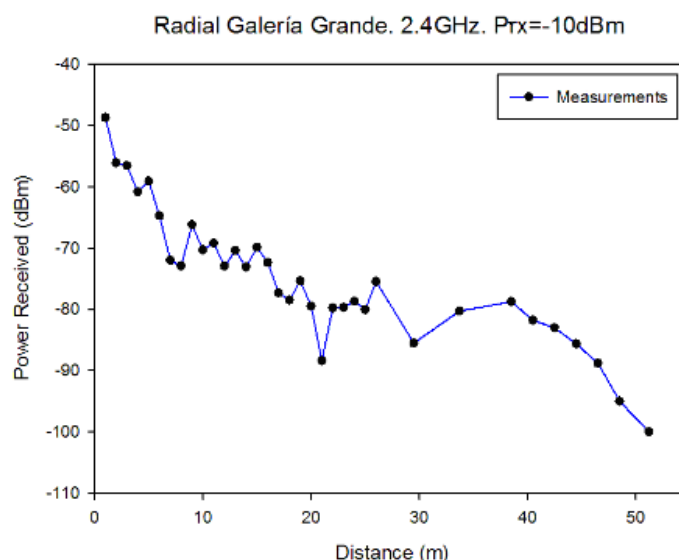


Figura 4.32. Gráfica representando la radial de la galería Grande en niveles de potencia recibidos.

Una vez hecha la primera radial y aprovechando la ubicación del emisor, se realizó una segunda radial. Esta, cogió dirección NE hacia la galería definida como Tobogán. En este caso

se hizo más complicado realizar la medida metro a metro, dado que el suelo tenía una pendiente más pronunciada que la anterior y una altura de cómo máximo 1,5m. La forma de la galería tiene cierto parecido a la de un túnel o mina, por su techo más o menos ovalado y el suelo más o menos plano, pero tiene las paredes muy rugosas, con muchos sedimentos y con algún que otro mineral.



Figura 4.33. Fotografía tomada desde la parte alta de la galería Tobogán hacia el emisor (no visión directa).

La intención fue averiguar el alcance en una galería con curva. Se debe tener en cuenta que la antena emisora no estaba exactamente a la entrada de esta galería, es decir, que a muy pocos metros (3m aprox.) ya no se tenía visión directa.

En cuanto la galería empezaba a girar, la señal, que ya era pobre antes del giro, se perdió totalmente una vez se produjo el giro.

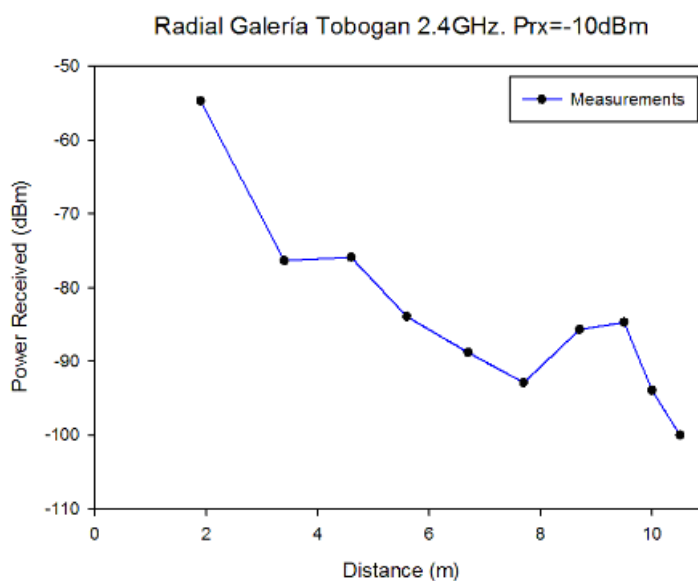


Figura 4.34. Gráfica representando la radial de la galería Tobogán en niveles de potencia recibidos.

A partir de los 8m parece que la potencia recibida aumenta, pero esto se debe a que se procuró mantener la antena lo más directo al transmisor posible. Dependiendo de la inclinación del suelo la antena se inclinaba más o menos, por tanto, la señal se atenuaba más o menos. El enlace, como se puede apreciar llegó débilmente a los 10m.

Para la tercera medida se hizo una radial en la zona definida como “el estrechamiento” para ver el comportamiento en una zona más confinada. Esta zona tiene la pared y el suelo considerablemente planos aunque, en el suelo exista una gran cantidad de piedras y polvo cálcico que puede influir en la señal. En este caso, al igual que en las anteriores, se cogieron medidas metro a metro. Pero las antenas, emisora y receptora (sobre todo esta última) estaban al ras del suelo puesto que la galería no pasa del metro de altura.



Figura 4.35. Fotografía tomada en el comienzo del estrechamiento. G.E.Satorrak

El equipamiento es el mismo que en las anteriores. Según lo medido, la señal se recibe débilmente hasta los 14m (pasado el estrecho), pero a un metro de este ya se considera como ruido lo que se recibe entorno a los 2.4GHz. El paso estrecho se considera en X=13m.

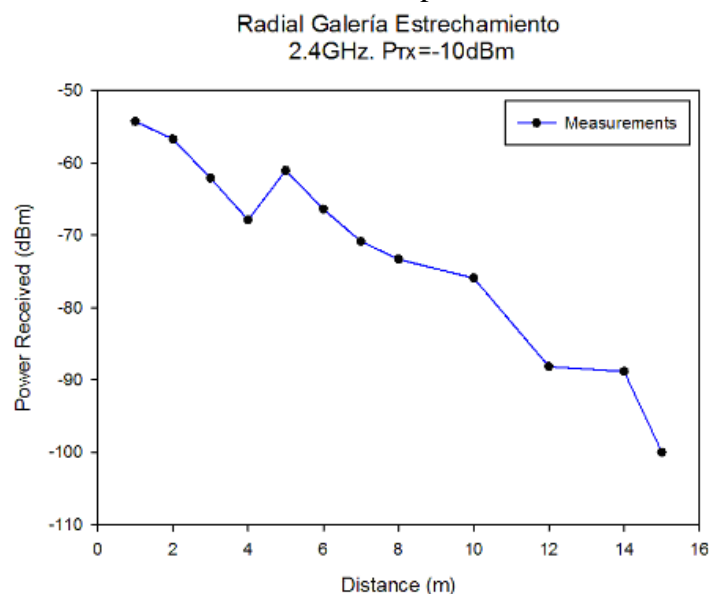


Figura 4.36. Gráfica representando la radial de la galería del estrechamiento en niveles de potencia recibidos.

4.5.2.2. Medidas de PER (Packet Error Rate).

En la segunda parte de las medidas, como ya se ha mencionado anteriormente, se hicieron medidas de PER, utilizando, ordenadores portátiles facilitados por la UPNA para este tipo de casos, motas Zigbee y del software mencionado para realizar las medidas de PER.

Al igual que en las medidas de RSSI, en las de PER, se trabajó principalmente en dos zonas: en las zonas definidas como zona 1 (Galería Grande) y zona 2 (Estrechamiento).

En la primera, se comenzó desde el mismo punto en el que se colocó el transmisor de la radial en la primera parte. En la primera medida, se hizo un enlace directo del punto ya definido, hasta alcanzar el borde del primer pozo, es decir, a 20.6m del transmisor. El emisor se configuró de manera que emitiese a 2.41GHz, con 18dBm de potencia y que mandase 10.000 paquetes a una tasa de 96kbps.

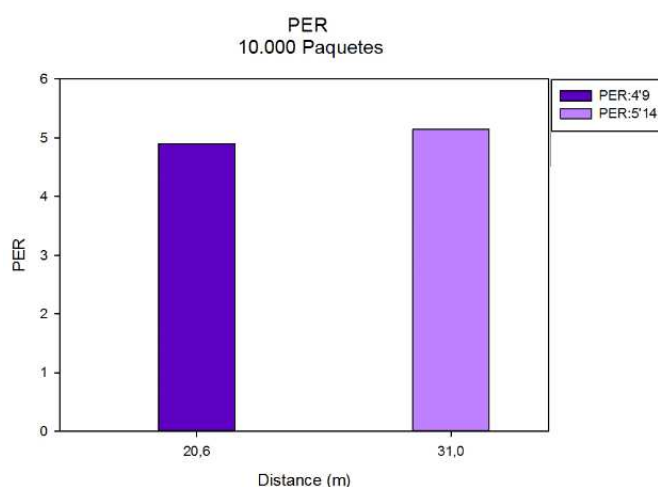


Figura 4.37. Gráfica representando el PER en cada punto de medición.

En la segunda medida se desplaza únicamente el receptor hasta un punto característico de la cueva, definido en la topografía y en la que se cruzan la galería principal con la galería definida como B. Se sitúa a 31 metros del emisor y se mantienen los parámetros que el enlace anterior. En este caso el PER es mayor, como puede apreciarse en la gráfica 4.37, ya que el enlace tiene un alcance mayor y la potencia media recibida es menor (-77dBm). Aún así se pueden tomar los 2 enlaces como buenos.

Para la siguiente tanda se cambia de zona. Se pasa a la zona del estrechamiento, colocando el emisor en el mismo emplazamiento que se ha utilizado en la radial. Y el receptor se coloca a la salida del estrechamiento, en el mismo punto en el se perdía la señal en la radial, es decir, a 14m del receptor (con paso del estrecho de por medio).

Por último se decidió probar un enlace más largo que el anterior (25m), manteniendo el emisor en el mismo sitio y alejando sólo el receptor. El lugar elegido fue el encuentro entre las dos galerías iniciales de la cueva, justo por delante del pozo que existe en esta otra zona. La prueba no resultó fructífera ya que tan sólo se recibió el primer paquete, el receptor se quedó esperando al segundo paquete, sin éxito.

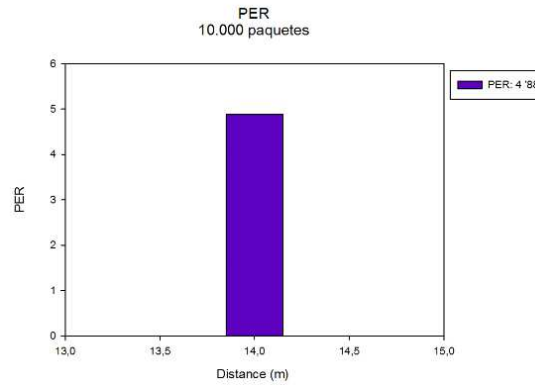


Figura 4.38. Gráfica representando el PER en el punto de la zona 2.

Para terminar se hicieron dos espectrogramas dentro de la cueva. En la zona del estrechamiento. Primero a -90dBm, pero como en el analizador de espectros, el ruido rondaba estos valores, se hizo un segundo espectrograma a -70dBm, sin encontrar señal alguna que interfiriese.

4.6. Simulaciones II.

Una vez procesados los resultados de las medidas de campo y deducidas las propiedades eléctricas de las rocas se procedió a rediseñar o perfeccionar los datos recogidos hasta ahora en simulación. Como ya se ha comentado anteriormente, el desarrollo cronológico del proyecto no coincide con el expuesto aquí, pero en todo caso, esta parte es la última en ambos.

Pasado el proceso de perfeccionamiento del escenario en Matlab, el siguiente objetivo fue el de realizar todas las simulaciones necesarias para llevar a cabo las conclusiones. Dentro de las zonas definidas anteriormente, se definieron pequeños escenarios, con la intención de visualizar a diferentes escalas el comportamiento de las ondas electromagnéticas. Además aprovechando la diversidad de conductividades definidas interesó sacar planos para visualizar los niveles de potencia en el aire y en la roca, y concluir su comportamiento.

4.6.1. *Propiedades eléctricas distintas*

Aprovechando la diversidad de conductividades definidas, a través de un escenario pequeño y las siguientes figuras, se pretende visualizar los niveles de potencia recogidos en distintas condiciones: Tomando dos planos de Y (Y=15m y el otro en Y=2.5m) se recogen datos de los niveles de potencia en condiciones de aire y roca, y todo roca respectivamente.

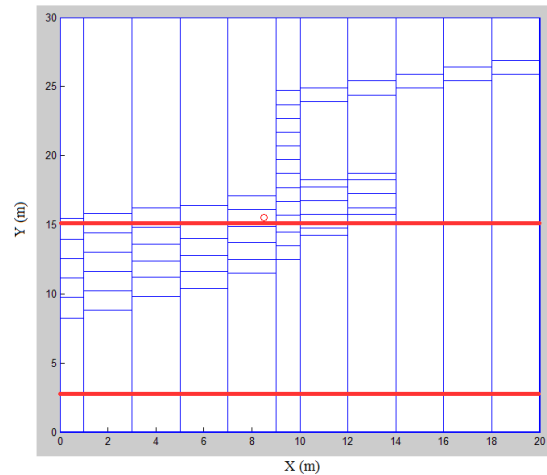


Figura 4.39. Representación de los planos de corte para las siguientes gráficas.

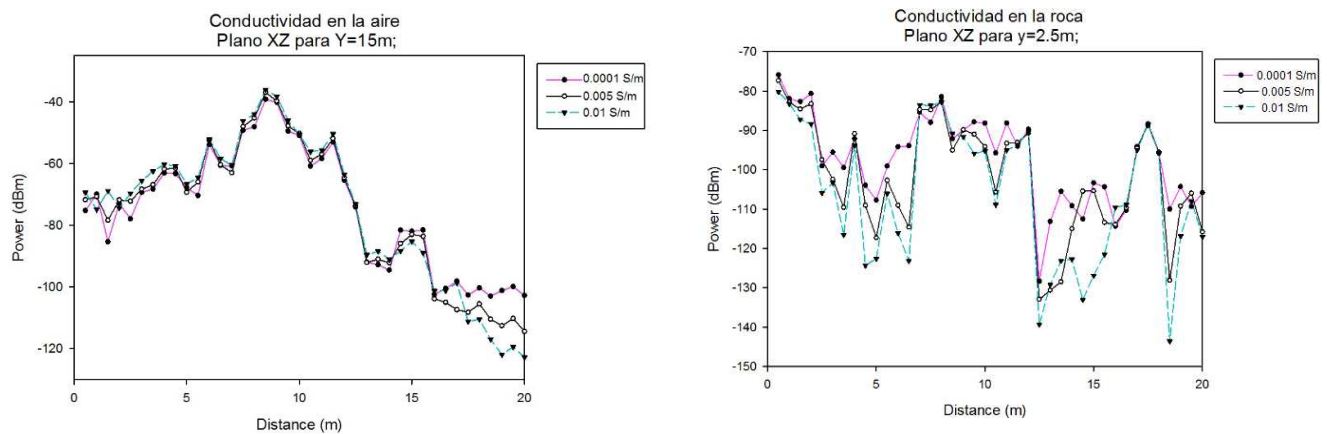


Figura 4.40 Representación de los planos de corte para las siguientes gráficas.

Como puede verse en la figura 4.40, la fuente se encuentra en $X=8.5\text{m}$, marcada con un círculo rojo. Esto también se aprecia en las gráficas dando los mayores valores de potencia entorno a ese punto. La apreciación más notable entre las dos gráficas es que en la roca los resultados tienden a ser más dispersos y en las zonas de roca, cuanto mayor es la conductividad, menores niveles de potencia presentan las dos gráficas.

4.6.2. Escenarios definidos por zonas

Ateniéndose a las zonas definidas en 4.5.2.1, se han planteado los siguientes escenarios: Parte I (equivalente a la zona 1), Parte II (equivalente a zona 2) y Parte III (equivalente a zona 3). Además del escenario completo, las zonas que más interés tienen son las de las zonas 1 y 2, ya que en estas fue donde se realizaron las medidas.

4.6.2.1. Escenario Parte I-10m

De todos los escenarios este es el más pequeño y corresponde a la parte final de la galería grande y el comienzo de la galería del tobogán. La antena se sitúa en el mismo punto en

el que se realizaron las medidas de campo y corresponde al centro del escenario aproximadamente. En este escenario se pretende ver dos cosas: aprovechando que es pequeño se intenta jugar con la resolución, definiéndolo a 0.5m y 0.2m, y al tener dos galerías se procura ver los niveles de potencia a las dos alturas.

A continuación se pueden ver las representaciones del escenario de distintas maneras. La imagen de la izquierda representa la parte de la cueva con cuboides, de manera que se aprecie su forma. La imagen de la derecha, en cambio, representa la cueva tal y como se ha simulado, dibujando los cuboides representando la roca y dejando el espacio como aire correspondiente a la cueva. Partiendo de esta, se han sacado los resultados, en planta, de las alturas correspondientes a la posición de la antena ($Z=5\text{m}$) con las distintas conductividades, y la altura de la galería superior ($Z=9\text{m}$) también a distintas conductividades.

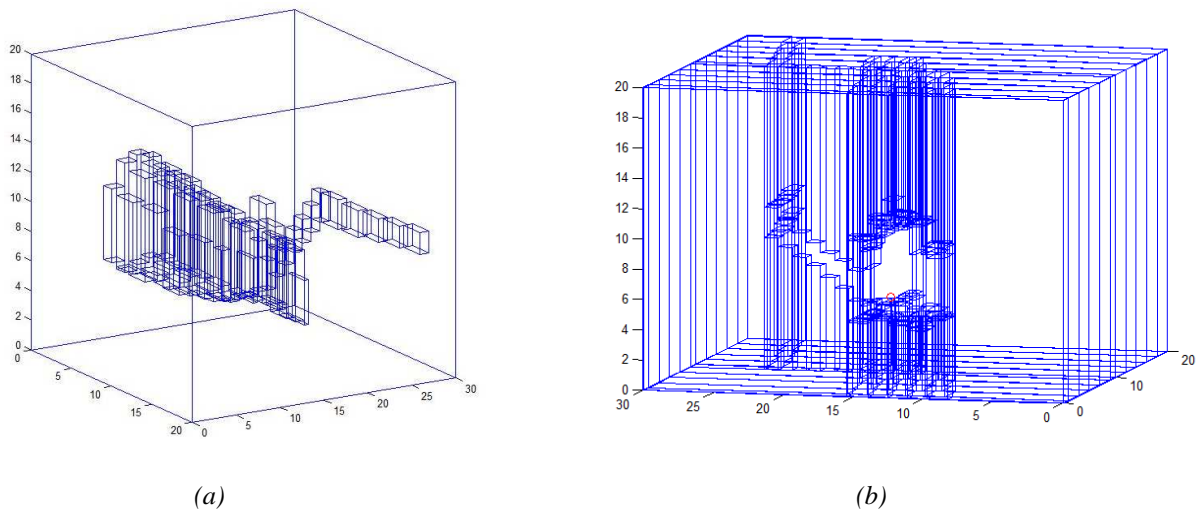


Figura 4.41a) Representación de la cueva en cuboides. b) Representación de la roca en cuboides y la cueva como aire (simulada).

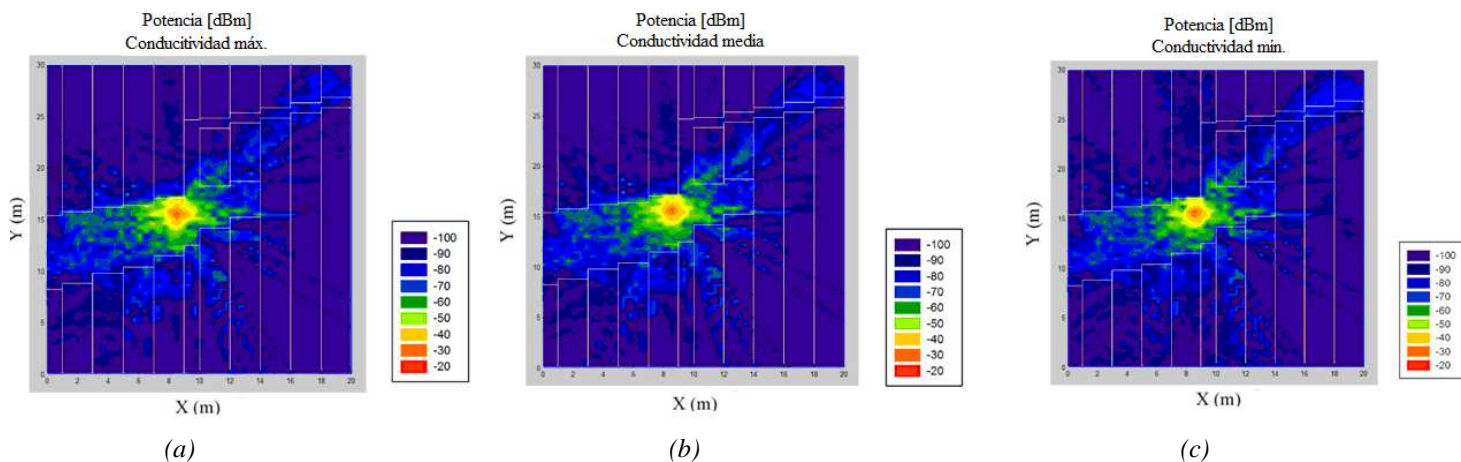


Figura 4.42.a) Mapa de potencias a $z=5\text{m}$ con conductividad 0.01 S/m. b) Mapa de potencias a $z=5\text{m}$ con conductividad 0.005 S/m. c) Mapa de potencias a $z=5\text{m}$ con conductividad 0.0001 S/m.

Las imágenes anteriores tienen una resolución a 0.2m es decir, que tienen una resolución alta, en cambio, en las siguientes imágenes, aunque estén a otra altura ($z=9\text{m}$) se aprecian los colores más difuminados. Estas tienen unas resoluciones más bajas, 0.5m.

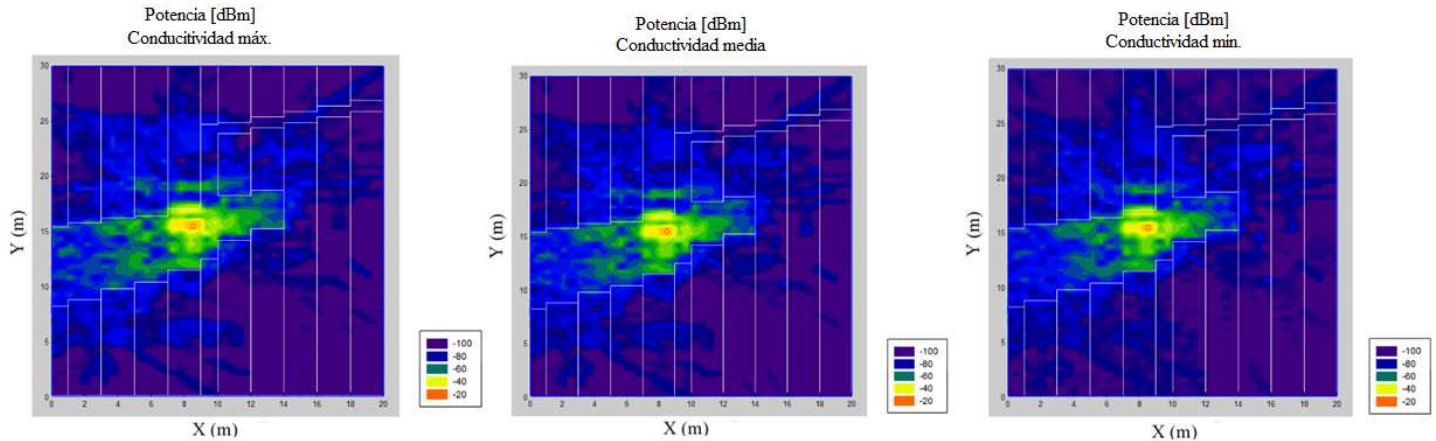


Figura 4.43. a) Mapa de potencias a $z=9\text{m}$ con conductividad 0.01 S/m . b) Mapa de potencias a $z=9\text{m}$ con conductividad 0.005 S/m . c) Mapa de potencias a $z=9\text{m}$ con conductividad 0.0001 S/m .

En apariencia, tanto estas imágenes como las anteriores, son prácticamente iguales en los tres casos, en los que la conductividad varía. Aunque probablemente se deba a que la escala de colores es baja, más adelante se podrá observar esta diferencia con el cambio de escala de -100 dBm a -150 dBm .

La razón por la que el límite inferior se ponga a -100 dBm es porque los sensores Xbee-Pro tienen una sensibilidad de -100 dBm , como la mayoría de los equipos comerciales de este estilo. Por tanto, la mayor parte de los mapas de potencias se han hecho a esta escala (-20 dB) – (-100 dBm).

4.6.2.2. Escenario Parte I-20m

El siguiente escenario es prácticamente el mismo que el anterior, sólo que se le ha añadido 10 metros más de desarrollo en dirección NO, y esto ha implicado agrandar las dimensiones de la “habitación” entera.

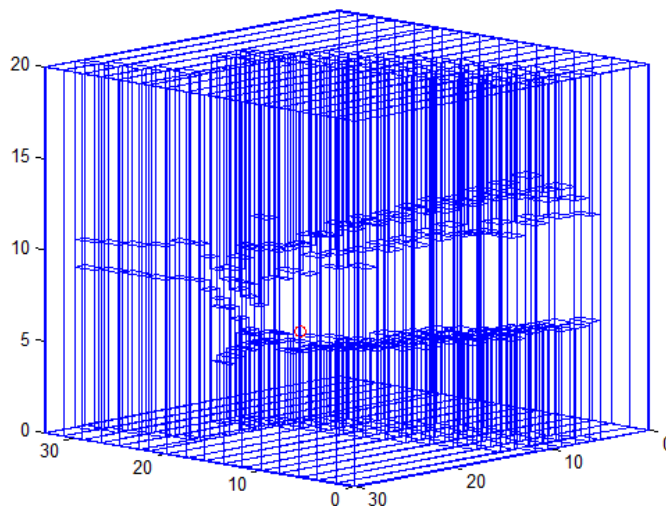


Figura 4.44. Representación de la roca en cuboides y la cueva como aire del escenario Parte I – 20m.

Al igual que para el escenario anterior, se presentan resultados en planta, de los mapas de potencia para una altura determinada. Lo que se ha cambiado es la escala, se ha pasado de tener un límite inferior de -100dBm a -150dBm. La idea, con esto, es de apreciar mejor la diferencia que existe entre las distintas conductividades definidas, sobre un mismo escenario y de visualizar de manera más ilustrativa los niveles de potencia distribuidos por todo el plano.

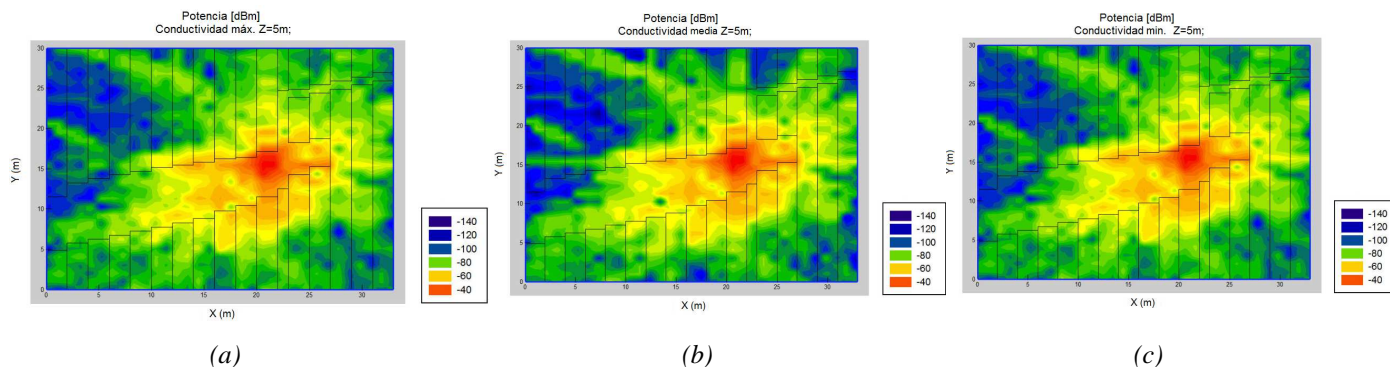


Figura 4.45. a) Mapa de potencias a $z=5m$ con conductividad 0.01 S/m. b) Mapa de potencias a $z=5m$ con conductividad 0.005 S/m. c) Mapa de potencias a $z=5m$ con conductividad 0.0001 S/m.

En las imágenes son apreciables pequeños cambios en la distribución de la potencia, sobre todo en zonas cercanas a las paredes, aún así, desde una perspectiva general, son bastante parecidas.

4.6.2.3. Escenario Parte I-50m

El siguiente escenario resulta un poco más complejo que los anteriores, puesto que se agranda hasta los 60 metros. Este escenario tiene una mayor importancia, pues tal y como se ha podido ver en las medidas de campo (4.5.2.1.), una de las radiales alcanzaba los 50 metros desde el punto de la posición de la antena hasta el punto en que la potencia era muy débil o casi nula.

Las siguientes imágenes pretenden visualizar de una manera más clara la forma del escenario, ya que si se representase la galería con toda la roca alrededor, no se apreciaría de forma intuitiva su morfología.

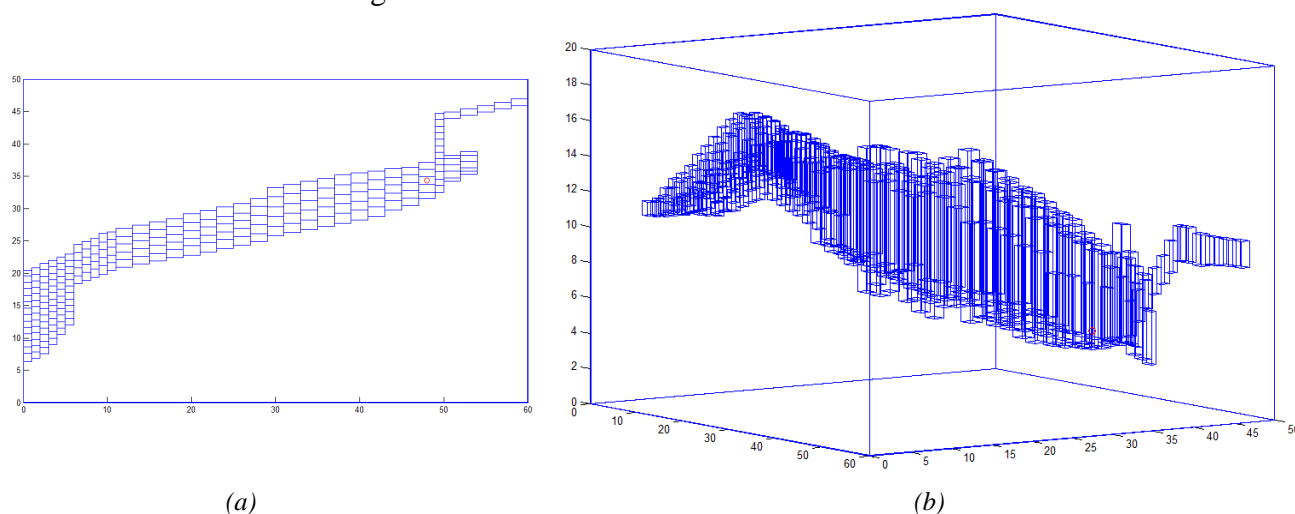


Figura 4.46. a) Planta del escenario definido como Parte I-50m correspondiente a la Galería Grande. b) Perspectiva del escenario definido como Parte I-50m.

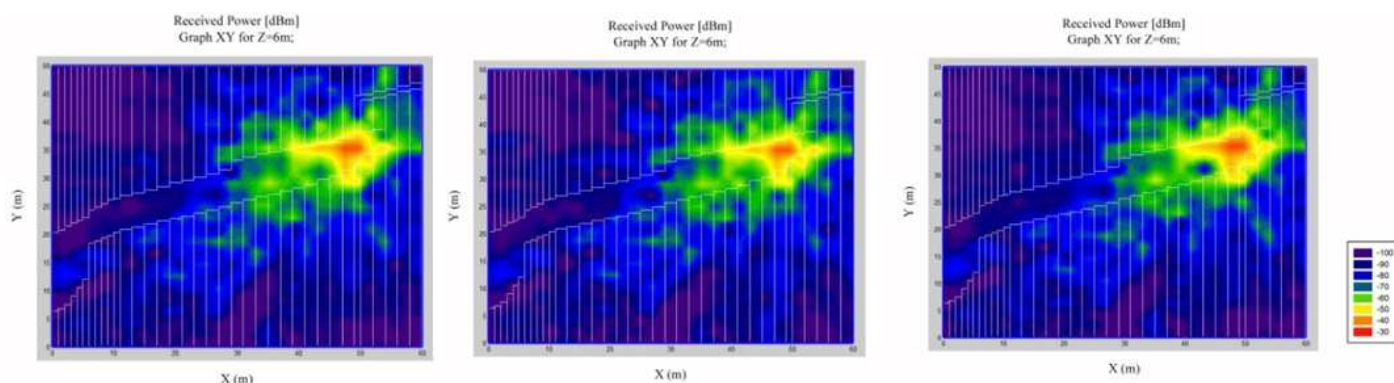


Figura 4.47. Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

Estas imágenes corresponden a una altura de $Z=6\text{m}$, que no es exactamente el punto en el que se encuentra la antena, pero al tener una resolución de 2m no es posible escoger el punto con $Z=5\text{m}$ que es en donde se sitúa la antena. En las tres imágenes se puede apreciar que desde la parte central hacia la izquierda la señal se atenúa considerablemente. La razón, es la pendiente de la galería y aproximadamente en esa zona es donde la señal se desvanece debido a la atenuación del suelo.

Tomando un corte más alto, correspondiente al último punto de la radial realizada en esta galería, se tiene los siguientes mapas de cobertura, para las distintas conductividades definidas.

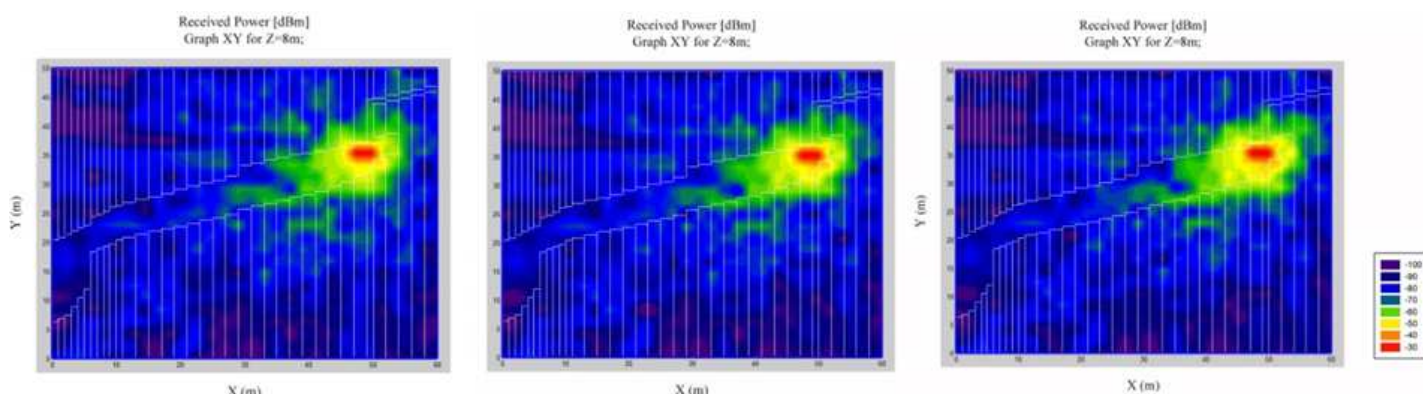


Figura 4.48. Planos XY del escenario definido como Parte I-50m correspondiente a la Galería Grande. Con conductividades de valor intermedio, valor mínimo y valor máximo respectivamente.

El último punto medido en la radial de 50m se localizar en el margen izquierdo, donde se aprecia un ensanchamiento de la galería. En los tres casos se puede decir que el nivel de potencia es mayor que los -100dBm , por lo que según las simulaciones se podría realizar un enlace punto a punto a 2.4GHz desde el comienzo de la galería hasta el final, alcanzando los 50m de distancia.

4.6.2.4. Escenario Parte II-10m.

En este apartado la zona de estudio cambia, se pasa a zona 2 también definida como parte II. Esta en concreto, se ha definido como Parte II-10m y después se analizará la parte extendida de esta. Este escenario, como el visto en 4.6.2.1 es de dimensiones relativamente pequeñas, por lo que, la resolución a la que se han hecho las simulaciones, es alta, concretamente 0.5 metros. Este escenario tiene cierto interés, ya que en él se produce un

estrechamiento de la galería. Como ya se vio en las medidas de campo, en este tipo de galerías la atenuación de la señal es bastante notable, el alcance no llegaba a los 15 metros.

Esto se ha intentado corroborar también a través del código, dibujando la zona en la que se recibió señal correctamente. Así, como se verá más adelante, se podrá comparar los valores obtenidos en las medidas con los simulados y cambiando las condiciones de la roca. El escenario simulado en la Parte II-10m es el siguiente:

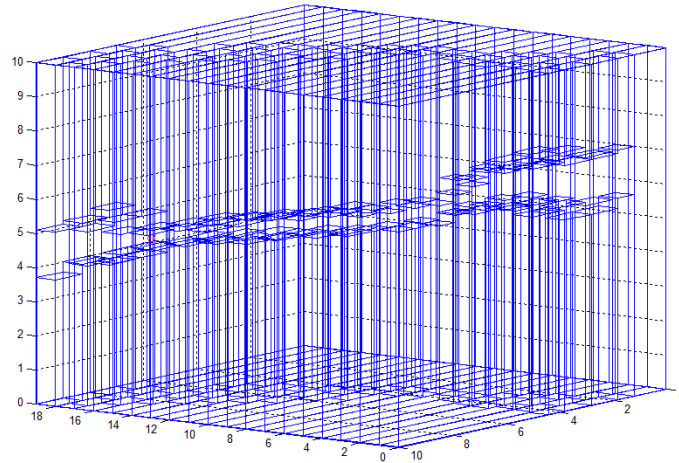


Figura 4.49. Representación en perspectiva de la Parte II-10m con la roca definida como cuboides.

En este caso también se intenta apreciar la diferencia entre las distintas conductividades, y se decide poner una escala en la que entraría el rango de sensibilidad de los módulos Zigbee. La altura a la que se representan estos planos, corresponde a la altura a la que se colocó la antena en las medidas, esto es, $Z = 4.5\text{m}$

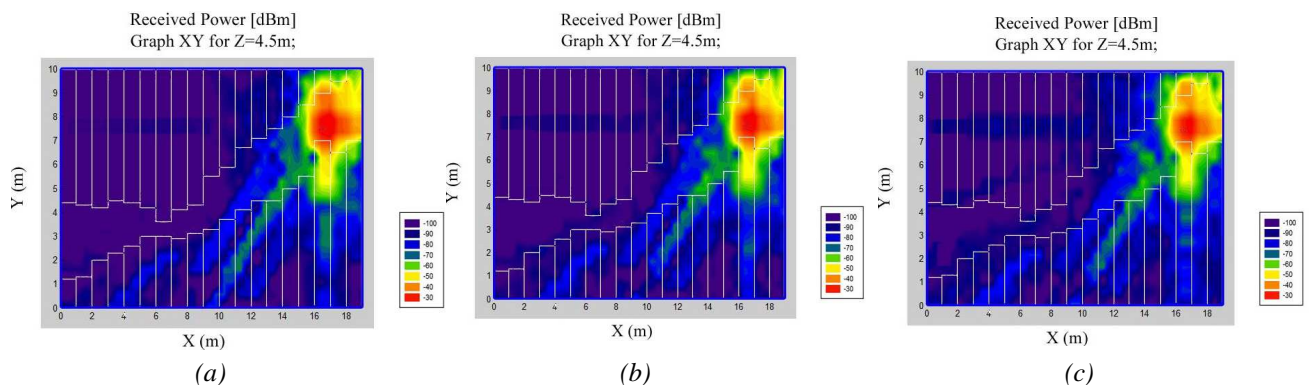


Figura 4.50. Resultados de los mapas de potencia de la Parte II-10m con distintas conductividades: (a) Conductividad máxima (0.01 S/m). (b) Conductividad media (0.005 S/m). (c) Conductividad mínima (0.0001 S/m)

Tal y como muestran las figuras, la gráfica en la que se define menor conductividad, tiene una mayor penetración en la roca. Esto sucede porque las paredes son más resistentes o menos conductoras y los rayos penetran más en ellas. Dicho de otra forma, el escenario con mayor conductividad en las paredes, hace que la potencia sea menor dentro de la roca y actúe a modo de espejo.

La siguiente imagen también corresponde a un mapa de potencias del escenario anterior. En este caso, se ha escogido una altura de $Z=6.5$ metros, es decir, un metro más alto de lo que estaba la antena y corresponde a la misma altura a la que se cogieron las medidas en el otro lado del estrechamiento.

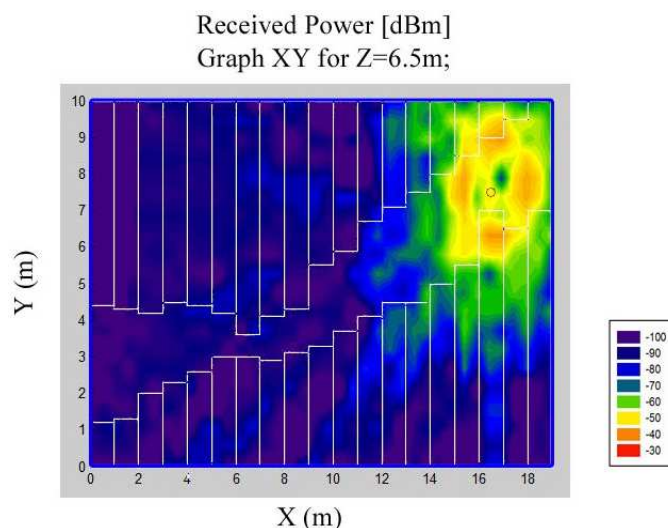


Figura 4.51. Resultado de mapa de potencias con conductividad de valor 0.005 S/m .

En la imagen se puede ver como en la parte izquierda del estrechamiento llega algo más de potencia que en los casos anteriores. Se aprecia también como en la zona en la que está posicionada la antena, los niveles de potencia forman un círculo o lo que puede interpretarse como un corte de un toroide, con máximos en los ejes X e Y, y mínimos en los ejes transversales.

4.6.2.5. Escenario Parte II-20m.

El siguiente escenario, corresponde a la ampliación del escenario anterior, con dimensiones tales que abarquen el último intento de enlace realizado el día de las medidas.

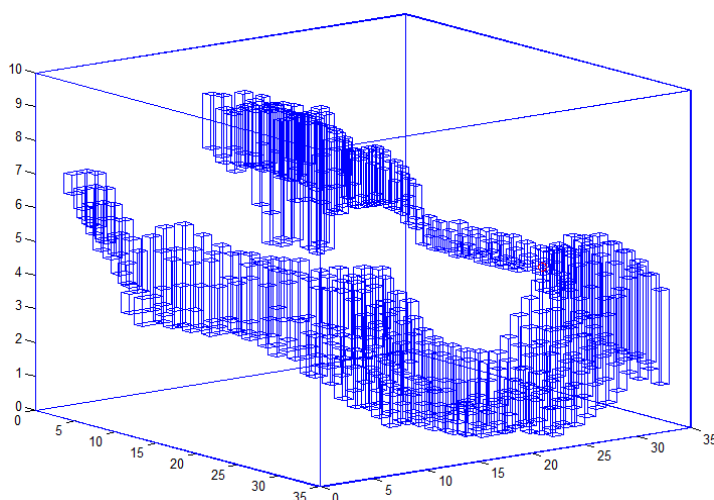


Figura 4.52 Representación del escenario correspondiente a la Parte II-20m sin representar los cuboides como roca sino como que como cueva.

En la imagen puede apreciarse un cruce entre dos galerías y unos metros más arriba la presencia de un pozo de unos 5 metros de profundidad. Desde la posición de la antena (círculo rojo) hasta después del pozo es el tramo que corresponde al enlace que se intentó realizar entre las motas Xbee-Pro, sin resultado satisfactorio. Mediante los mapas de potencias del código de simulación se va a intentar corroborar ese hecho. Por tanto, los mapas que se representan a continuación, corresponden a la altura a la que se encontraba el módulo receptor y aplicándoles las distintas condiciones de la rocas.

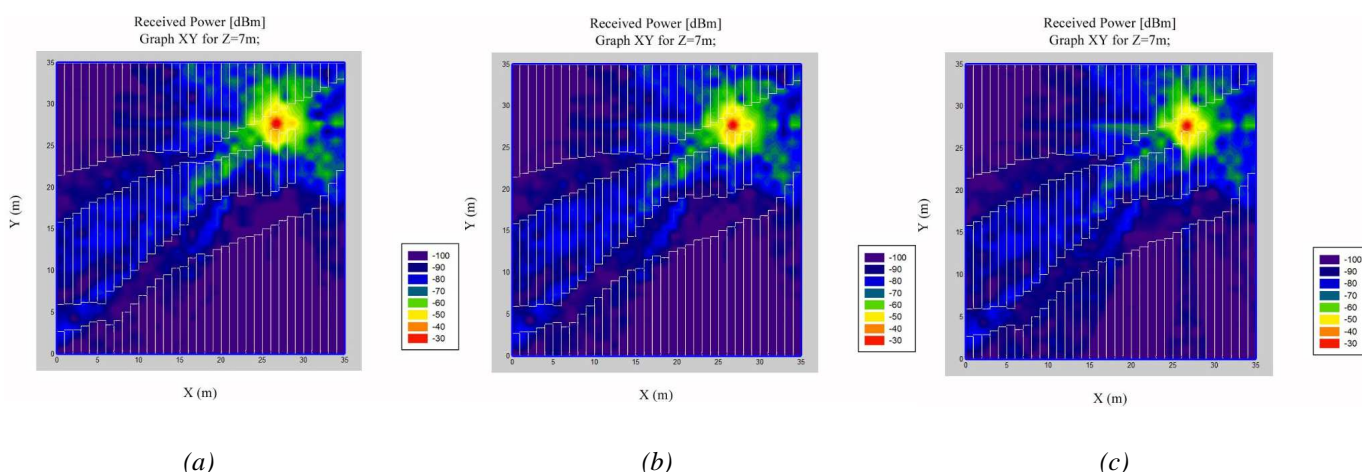


Figura 4.53. Resultados de los mapas de potencia de la Parte II-20m con distintas conductividades: (a) Conductividad máxima (0.01 S/m). (b) Conductividad media (0.005 S/m). (c) Conductividad mínima (0.0001 S/m)

4.6.2.6. Escenario Parte III-20m.

Por último, se muestra el escenario correspondiente a la entrada de la cueva, que en su día no se pudieron realizar las mediciones por el gasto de batería que supuso realizar todas las medidas mencionadas en el punto 4.5. Dado que en simulación no existen problemas de este tipo se analizó de igual manera el escenario. El escenario corresponde a la boca y a parte de las galerías contiguas a ella, y la antena se ha colocado en la misma boca de la cueva con un círculo rojo, de manera que se aprecie el alcance que tiene.

A continuación se muestra la representación en Matlab de la perspectiva del escenario correspondiente a la Parte III, pero es necesario recalcar que tanto la figura 4.52 como la 4.54. son figuras que no representan el escenario que después se ha simulado, sino que son escenarios a modo de una mejor visualización del mismo.

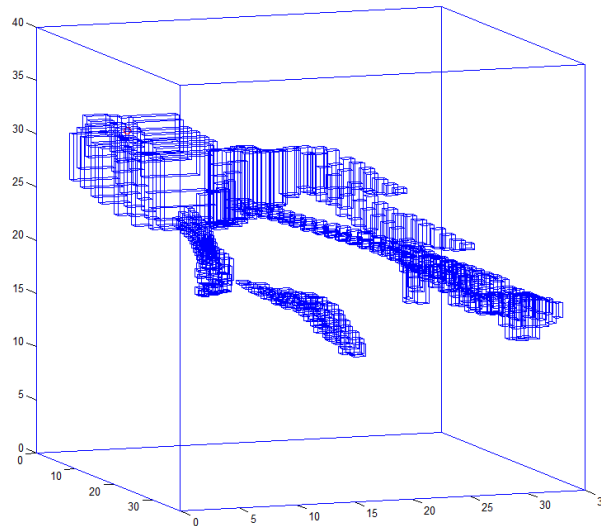


Figura 4.54. Representación del escenario correspondiente a la Parte III-20m, con cuboides definidos como cueva (aire).

La idea en este escenario es visualizar el alcance máximo que existe, para más adelante poderlo comprobar mediante medidas reales. A partir de los siguientes mapas de potencias se puede sacar alguna conclusión. Los mapas corresponden a distintas alturas ($Z=30\text{m}$; $Z=25\text{m}$; $Z=20\text{m}$), ya que el desarrollo de la cueva tiene varias variantes a la hora de acceder a las galerías posteriores.

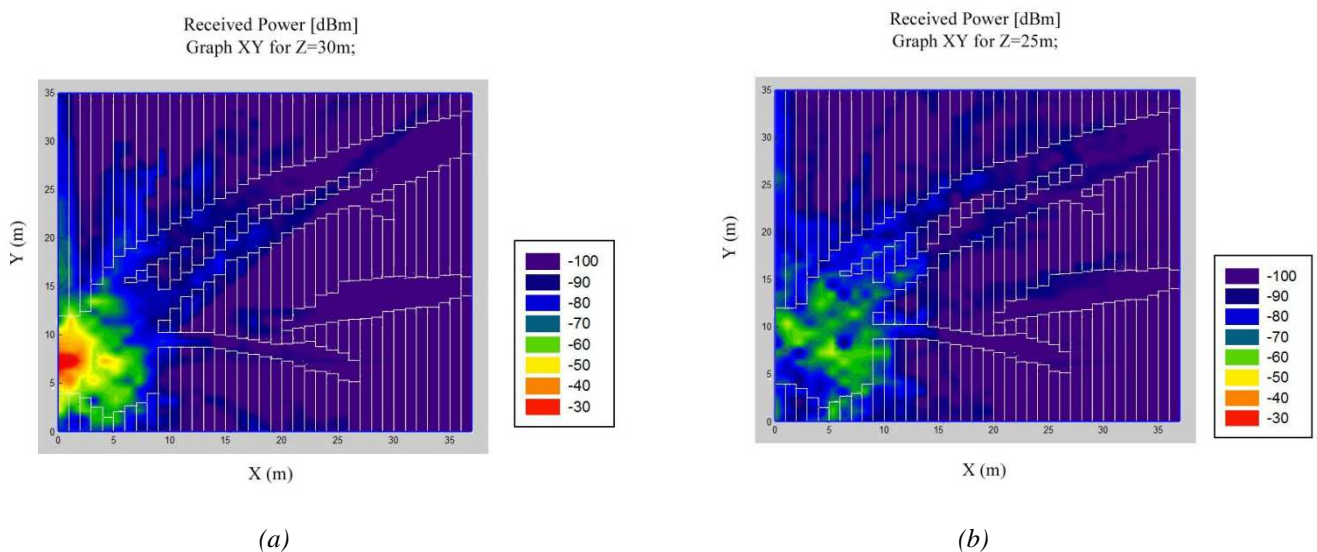


Figura 4.55. Resultados de los mapas de potencia de la Parte III-20m con distintas alturas: (a) Conductividad media (0.005 S/m), altura $Z=30\text{m}$. (b) Conductividad media (0.005 S/m), altura $Z=25\text{m}$.

4.7. Comparación entre simulaciones y medidas.

Una vez analizadas las medidas y todas las simulaciones, el último paso es compararlas de forma analítica. Durante todo el desarrollo se han expuesto los datos recogidos por separado tanto los recogidos de manera analítica como métrica.

A continuación se van a representar estos datos conjuntamente y se analizarán las posibles similitudes y diferencias que existan, indicando el error cometido entre las medidas y las simulaciones. La mejor manera de representar estos datos ha sido tomando como referencia las radiales realizadas en la cueva el día de las medidas. En función de los puntos en los que se cogieron las medidas, se han cogido los datos de simulación desde las matrices resultantes, intentando ser lo más exacto posible.

4.7.1. *Radial de 50 metros reducida.*

Para empezar con la comparativa, se ha escogido la radial de 50m, pero para una primera vista se han cogido los primeros 20 metros. Este punto es característico, puesto que ya viene definido en la topografía, se hicieron medidas metro a metro hasta este punto (a partir de ahí la radial varió la trazada dada la orografía de la cueva) y además se hizo un enlace con las motas Zigbee desde el punto del emisor hasta aquí. El escenario Parte I-20m también tiene referenciado el último punto de esta radial por lo que se toman los valores de esta simulación hecha a una resolución de 1m. El hecho de que tenga esta resolución le da más importancia a la comparativa ya que los valores medidos en estos primeros 20m también se tomaron metro a metro cuidadosamente. Por tanto, los datos que resulten de la comparativa serán de una fiabilidad alta.

La siguiente gráfica muestra los valores de potencia recogidos hasta el punto citado, comparado con los sacados de la simulación.

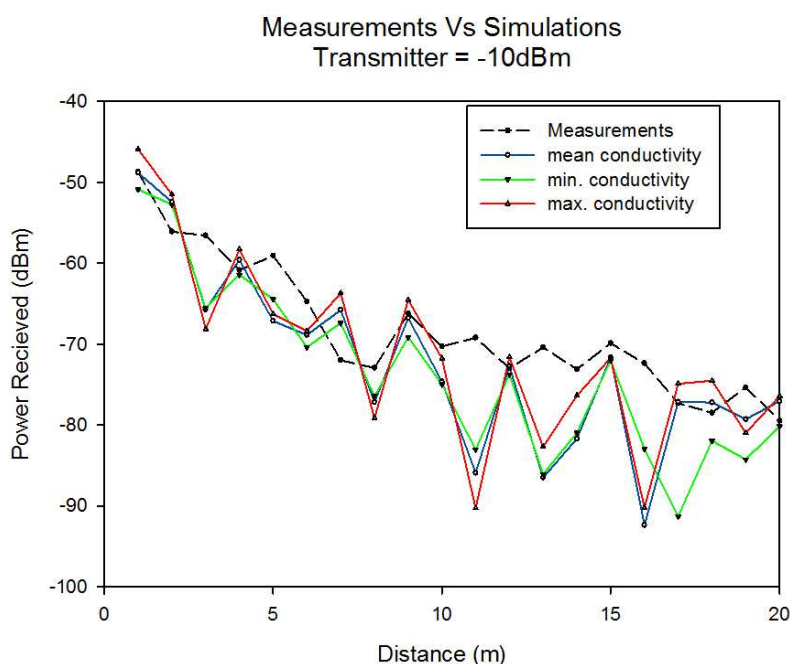


Figura 4.56 Gráfica: representación de los primeros 20m de la radial de 50m, comparado con valores obtenidos a partir de las simulaciones.

Tal y como puede verse en la figura 4.56, los datos obtenidos de las simulaciones a distintas conductividades son bastante parecidos y comparados con los datos medidos, se puede decir que caen en función de la distancia con cierta similitud.

La forma más indicada de mostrar las diferencias que existen entre los valores medidos y simulados es con el error absoluto. La siguiente figura muestra el error que se comete en cada simulación con conductividad distinta y el error medio entre los tres.

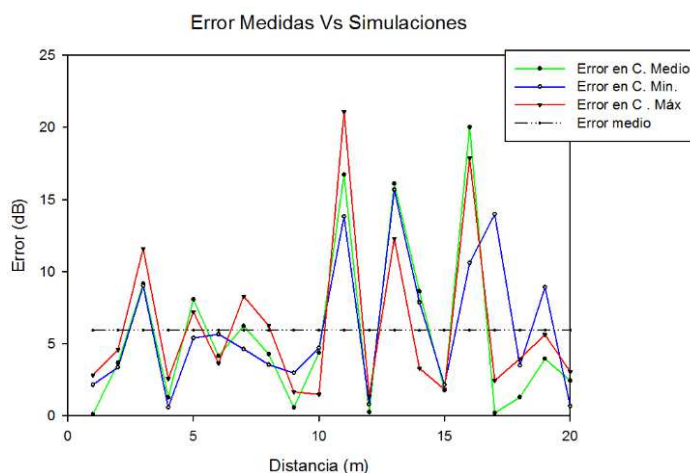


Figura 4.57 Gráfica: representación del error cometido entre las distintas simulaciones con respecto a las medidas. Indicado el error medio de los tres.

4.7.2. Radial de 50 metros

Una vez vistos los veinte primeros metros de la radial de 50m, lo siguiente en analizar, lógicamente será la radial entera. A diferencia de la comparativa anterior, las simulaciones hechas para este escenario (Parte I-50m) tienen una resolución de 2m, cosa que hace que los datos puedan llevar a un error mayor que el anterior. Además los datos recogidos, a partir de los 20m, en las medidas no son metro a metro, sino que dependen de la orografía de la cueva y tuvo que amoldarse a los sitios en los que se podían tomar medidas.

Por eso es importante recalcar que los datos que se muestran a continuación tienen una menor fiabilidad que los anteriores, por las razones que se han mencionado.

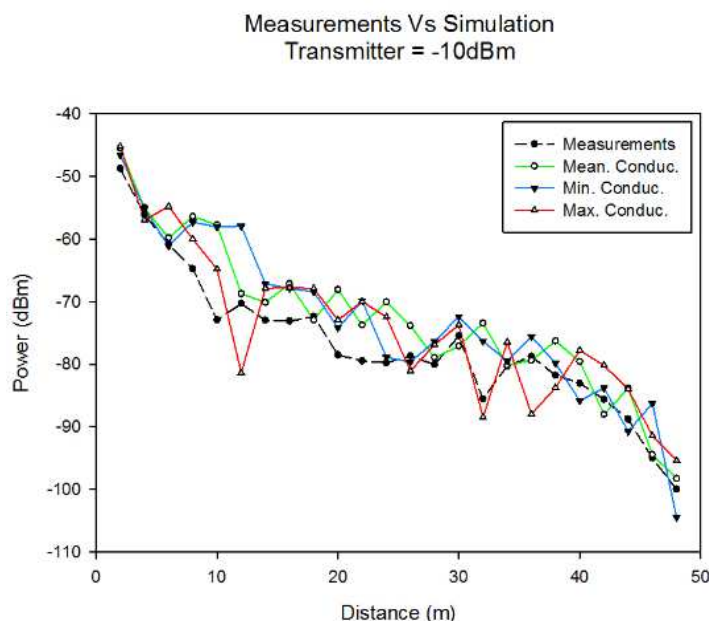


Figura 4.58 Gráfica: representación de la radial de 50m, comparado con valores obtenidos a partir de las simulaciones.

Y como se ha hecho en el apartado anterior, con esto, se va a representar el error cometido en las tres simulaciones con respecto a las medidas, y el error medio cometido.

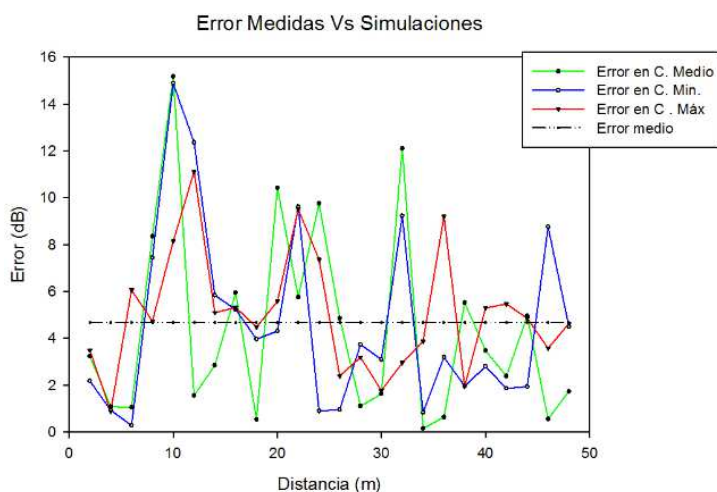


Figura 4.59. Gráfica: representación del error cometido entre las distintas simulaciones con respecto a las medidas. Indicado el error medio de los tres.

4.7.3. Radial de 15 metros (estrechamiento)

La última radial por representar corresponde a la que se hizo en la galería definida como estrechamiento. En las medidas realizadas, la antena se colocó a un lado del estrecho y metro a metro se fueron tomando los valores de potencia hasta llegar al otro lado del estrecho, a un alcance de 15 metros. El escenario de simulación Parte II-10m recrea ese mismo estrechamiento y a una resolución de 1m, cosa que facilita la obtención de los datos de simulación para poder compararlos.

En la siguiente gráfica se muestra la comparación de los valores medidos y los valores simulados en la galería del estrechamiento.

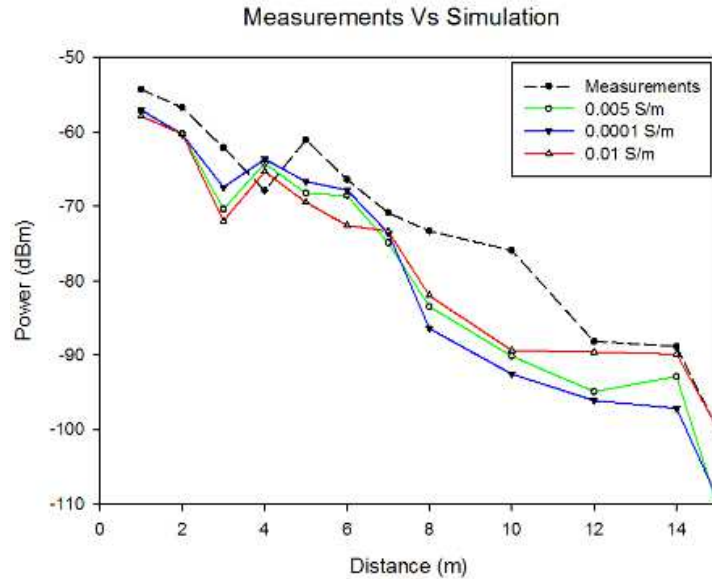


Figura 4.60. Gráfica: representación de la radial de 15, comparado con valores obtenidos a partir de las simulaciones.

A continuación se muestra el error absoluto cometido en las valores de simulación con respecto a los medidos.

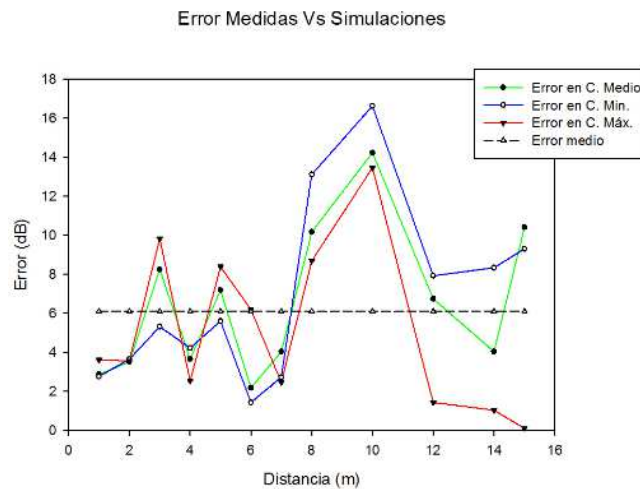


Figura 4.61. Gráfica: representación del error cometido entre las distintas simulaciones con respecto a las medidas. Indicado el error medio de los tres.

Según la gráfica 73 el error medio que se comete entre los valores de conductividad con respecto a las medidas es de 6 dB. No es un valor precisamente alto, como tampoco lo ha sido ninguno de los casos que se ha estudiado el error. En ninguna de las tres radiales se ha sobrepasado los 6 dB de media de error. Aunque se puede comentar que el nivel de mayor error que se ha cometido ha sido en la radial de 20m, obteniendo un valor de pico de 21 dB de error absoluto entre el valor de mayor conductividad y la medida realizada.

4.8. Comparación entre simulaciones I y simulaciones II.

Además de las comparaciones entre las medidas realizadas en la cueva y las simuladas, una de las comparaciones posibles es la de comparar las simulaciones hechas a principio del proyecto, definiendo el material de la roca como hormigón, y ver el comportamiento que tienen frente a los materiales ya definidos como roca con los distintos valores de conductividad y permitividad relativa.

A continuación se muestran, a modo visual, los resultados obtenidos en ambas simulaciones para el mismo corte en Z ($Z=30\text{m}$).

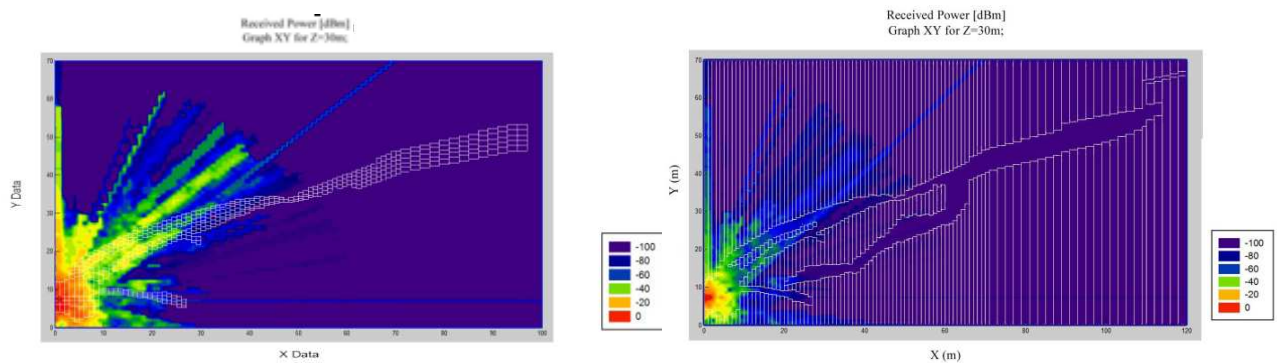


Figura 4.62 Representación de los mapas de cobertura. Izquierda: mapa correspondiente a la cueva completa con material definido como hormigón. Derecha: mapa correspondiente a la cueva completa con material definido como conductividad intermedia (0.005 S/m).

A simple vista parece que con el hormigón la penetración en las paredes es mayor, y es que en la realidad esto debería darse así. Las paredes de las rocas tienen cierto punto de conductividad que el hormigón no tiene, por tanto las ondas electromagnéticas penetrarán más fácil en el hormigón que en la roca.

4.9. Representación 3D de los resultados.

A modo de una visualización de los resultados, se han representado varias partes de los escenarios definidos en el apartado 4.6.2., en 3D. Utilizando la herramienta software llamada Blender, se ha conseguido representar las galerías de la cueva. Utilizando los mapas de cobertura de los resultados correspondientes a cada parte, se muestran algunas de las galerías incorporando los mapas de potencia más representativos.

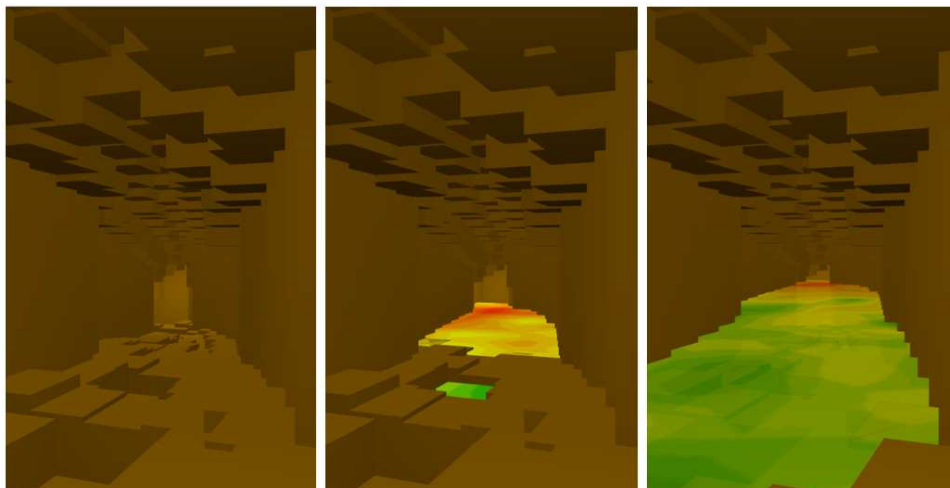
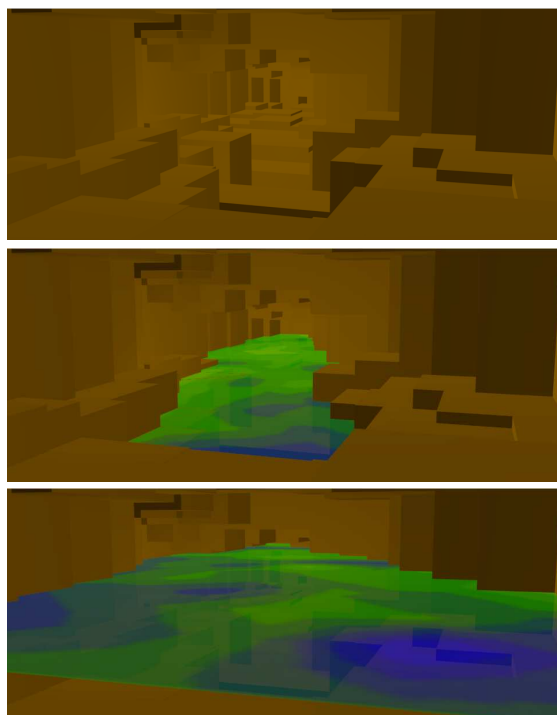
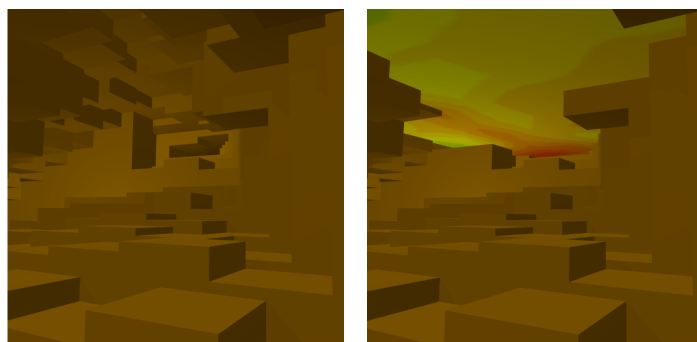


Figura 4.63. Representación 3D de la galería Grande, incorporando los mapas de valores de potencia, correspondientes a distintas alturas.



(a)



(b)

Figura 4.64. Representación 3D de la galería del estrechamiento. (a) Galería del estrechamiento vista desde el otro lado de la fuente. (b) Galería del estrechamiento vista desde el lado de la fuente.

5. Conclusiones

Al valorar los resultados que se han obtenido a partir de las comparaciones hechas entre las mediciones y las simulaciones, se puede decir, que existen muchas similitudes. El error medio entre los errores absolutos de cada caso no ha superado los 6dB, aunque el nivel de mayor error absoluto cometido ha sido en la radial de 20m, obteniendo un valor de pico de 21 dB, entre el valor de mayor conductividad simulada y la medida realizada.

Hay que tener en cuenta que en los escenarios creados, no se ha aplicado ningún tipo de rugosidad a las paredes y que se han obviado muchos de los obstáculos que existen en la cueva. Sin embargo, los datos demuestran una cierta aproximación a los datos reales. Esto denota que el código realizado, se ha acercado sensiblemente a las condiciones reales de la cueva.

Otro de los puntos a destacar, es la definición de los materiales con los parámetros de conductividad y permitividad relativa. La difícil tarea de buscar un valor exacto a estos parámetros, definiendo las condiciones en la que se encuentra una cueva, ha llevado a que se definan tres tipos de materiales distintos, pero los tres comportándose como si fuesen roca. Esto ha hecho que se aprecie el efecto que produce el que un escenario tenga más o menos conductividad y la influencia que tiene esto en valores de potencia. El trabajar sobre un código ya creado en Matlab, y llegando a crear más de 1500 líneas añadidas de código, remarca la complejidad que tiene el crear un escenario y un proyecto de estas características.

Todo esto, marca los resultados que se han obtenido durante la elaboración del proyecto, y ayuda a que se pueda llegar a la conclusión de que un sistema basado en tecnología Zigbee trabajando a 2.4GHz pueda llevarse a la realidad. La idea es factible siempre que se conozca mínimamente la cueva o se tenga un plano topográfico de ella. Así, podrá evitarse cualquier sistema cableado dentro de una cavidad subterránea, y el ahorro en eficiencia que eso conlleva a la hora de establecer una comunicación en una cavidad.

6. Líneas futuras

Según las conclusiones del punto anterior, hay varias líneas a seguir. Enfocándolo a corto plazo se puede pensar (y de hecho se piensa en continuar por esta línea) realizar este mismo estudio, pero trabajando a distintas frecuencias como pueden ser 868 MHz o 430MHz. El que se trabaje a frecuencias más bajas, supone que las longitudes de onda aumenten y por tanto den un alcance mayor salvando obstáculos que a frecuencias como 2.4GHz atenúan la señal fuertemente. Además esas frecuencias tienen un grado de penetración mayor en la roca, lo que hace que pueda traspasarse mejor una pared de roca.

Otra línea a tener en cuenta y que se está estudiando, es la de crear una red ad-hoc dentro de una cueva incorporando más motas con las que intercomunicarse. Combinando el auge de las redes de sensores y las conclusiones de este proyecto, se incrementan aún más si cabe, las posibilidades de aplicación de estos sistemas, basados en la transmisión en tiempo real. Por lo tanto, con los objetivos marcados al comienzo de este trabajo ya cumplidos, las ideas para posibles aplicaciones en el terreno de la espeleología crecen cada vez más. Una de las más destacadas es la de usar como sistema de comunicaciones en operaciones de socorro y espeleosocorro. Es por ello que la monitorización de las condiciones ambientales de una cueva, así como los seguimientos de la fauna existente en las cuevas, es un paso al futuro del que no se está tan lejos.

Tal vez, aún quede un tiempo en el que los sensores se incorporen a los trajes de los espeleólogos, pero viendo los avances hechos en estos sistemas (caso de los nuevos trajes de bomberos de la C.A.V.) se puede pensar que estos se verán integrados, tanto en tejidos textiles como en biológicos, dando funcionalidades biomédicas en situaciones de emergencia en los lugares más inhóspitos, como pueden ser las cuevas.

7. Bibliografía

- [1]. Lino del Campo Castañeda. “*Introducción a los sistemas de comunicación a través de formación*”. Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga. (G.E.S. de la S.E.M.) Andalucía Subterránea nº 18, pp 22-25.
- [2]. BCRA (*British Cave Research Association*) Cave radio and Electronic Group. Journals. Heyphone Documentation Set. 2002.
- [3]. Escuela Española de Espeleología. Cursos de técnicos. Comunicaciones.
- [4]. J.A. Cuchí, J.L. Villarroel, A. Mediano, V. Viñals, V. Bataller, A. Muñoz y F. Rosas: “*TEDRA, the development of a Software Defined Cave Radio*”, CREG Journal, Vol.67, pp.4-6, Jun 2007.
- [5]. A. Muñoz, F. Lera, A. Mediano, V. Bataller, J. A. Cuchí, J. L. Villarroel. “*Design of a voice communication system for underground environments using current injection techniques*”. Grupo de Tecnologías en Entornos Hostiles. Universidad de Zaragoza. 2008
- [6] J.Chiba, T. Inaba, Y. Kuwamoto, O. Banno, R. Sato. “*Radio Communication in Tunnels*”.1978
- [7] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). IEEE Trans.Antennas Propag.
- [8] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks— Part 15.6: Wireless Body Area Networks. IEEE Trans.Antennas Propag.
- [9] A. O. Isikman, L. Cazalony, F. Chenz, P. Lix. “*Body Area Network*” IEEE Std 802.15.6-2011, IEEE 2011.
- [10] M. Ndoh, G.Y. Delisle. “*A modern approach to complex propagation problems in confined media*”.Electrical and Computer Engineering Dept. Laval University, Sainte-Foy,Qc, Canada
- [11] M. Ndoh, G.Y. Delisle, “*Propagation Characteristics for Modern Wireless System Networks in Underground Mine Galleries*”. NRC Publications Archive (NPArc)
- [12] A. G. Yavuz, Z. C. Taysi, E. Celik. “*In cave Communication System*”. Third International Conference on Next Generation Mobile Applications. 2009
- [13] M. D. Bedford ,G. A. Kennedy “*Evaluation of ZigBee (IEEE 802.15.4) Time-of-Flight-Based Distance Measurement for Application in Emergency Underground Navigation,*” IEEE Trans.Antennas Propag., vol. 60, no. 5, 2012.
- [14] M. Liénard, P. Degauque, Member, “*Natural Wave Propagation in Mine Environments*” IEEE Trans.Antennas Propag., vol. 48, no. 9, 2000.
- [15] A. Benzakour, S. Affes, C. Despins, P.M. Tardif , “*Wideband Measurements of Channel Characteristics at 2.4 and 5.8 GHz in Underground Mining Environments,*” IEEE Trans.Antennas Propag., 2004.
- [16] R. He, Z. Zhong, B. Ai1, K. Guan, B. Chen, J. I. Alonso, C. Briso,” *Propagation channel measurements and analysis at 2.4 GHz in subway tunnels,*” Technical University of Madrid, Spain. IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2013
- [17] A. D. Wilson, “*Channel Characterisation and System Design for Sub-Surface Communications,*” School of Electronic and Electrical Engineering. Univeristy of Leeds. 2003
- [18] J. Pingnot , R. Rieben , D. White, “*Full wave analysis of RF signal attenuation in a Lossy Cave*” Lawrence Livermore National Laboratory

- [19] Y.P. Zhang, G. X. Zheng, and J. H. Sheng. “Radio propagation at 900MHz in underground coal mines”. IEEE Trans.Antennas Propag., vol. 49, no. 5, 2001.
- [20] *Feasibility of a Millimeter-Wave MIMO System for Short-Range Wireless Communications in an Underground Gold Mine*
- [21] M. Rak, P. Pechac, “UHF Propagation in Caves and Subterranean Galleries” IEEE Trans. Antenna Propag.,vol. 55, no. 4, 2007.
- [22] J. Cardy, “Radio Propagation Testing in Lava TubesCave”, Research Foundation Volunteer. Speleonics. 2011
- [24] B. Bruninga, R. Toomey, G. Gibula. “ Cave Link Radio Communications Test”. Speleonics. 2013
- [25] M. I. Tabar, M. Unzu. “Cuencas Mineras de Época Romana. I. Lanz”. Trabajos de Arqueología Navarra/5, p.p. 262-278, Pamplona, 1986.
- [26] A. Eraso. “Gruta de Lanz”. Universidad Politécnica de Madrid. Mundo Subterráneo, p.p. 17-24. Enresa.1994
- [27] E. Faci, G. Galán, A. García, P. Cabra, J. González, L. M. Martínez, A. Pesquera, “Memoria Cartografía Geológica de Navarra”, hoja 90-IV, Alkotz. TECNA (Tecnología de la naturaleza S.L.). 2002
- [28] D. Chapellier, “Prospection électrique de surface”, Cours online de géophysique. Université de Lausanne. Intitut Français de Pétrole. 2000
- [29] Z. Blanco. “Medida de la Resistividad Eléctrica del subsuelo”. Introducción al método de prospección eléctrica (geoeléctrica). Capítulo2. pp. 1-24. 2013
- [30]E. Orellana, “Prospección geoeléctrica en corriente continua”. Paraninfo. Madrid. 1982. ISSN: 84-283-153-6
- [31] “Electrical Properties of Rocks and Minerals “. Cambridge University. Cap. 5. 1990.
- [32], IU.V. Iakubovskii, L.L. Liajov. “Exploración eléctrica “. Versión española de la 3º edición rusa. Editorial Reverté.
- [33] W. E. Kenyon. “Texture effects on megahertz dielectric properties of calcite rock samples”. Journal of Applied Physics 55.1984
- [34] P. Gracia. “Características de la propagación de las ondas de radar en medios materiales”. Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico. Cap. 4, pp. 99-146. 2001.
- [35] D. B. Apel, V. Dezelic, “Using Ground Penetrating Radar (GPR) in Analyzing structural composition of Mine Roof” . University of Missouri. 2004

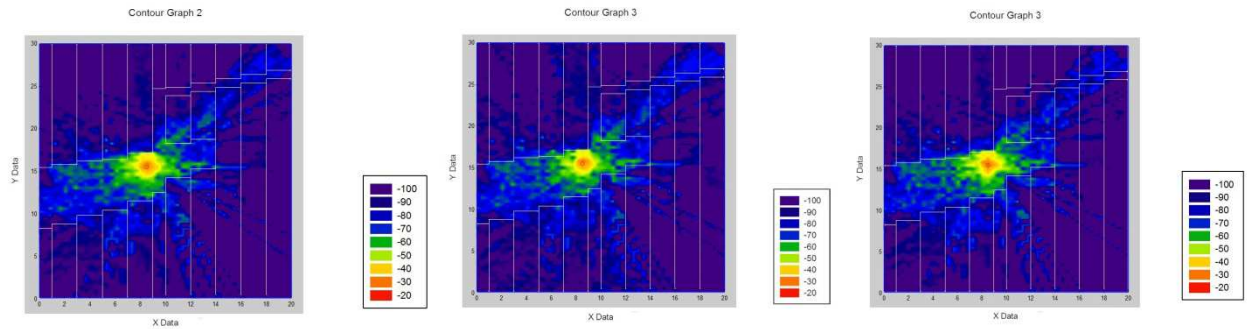
8. Anexos

ANEXO I

Escenario Parte 1: Resolución 0.2m

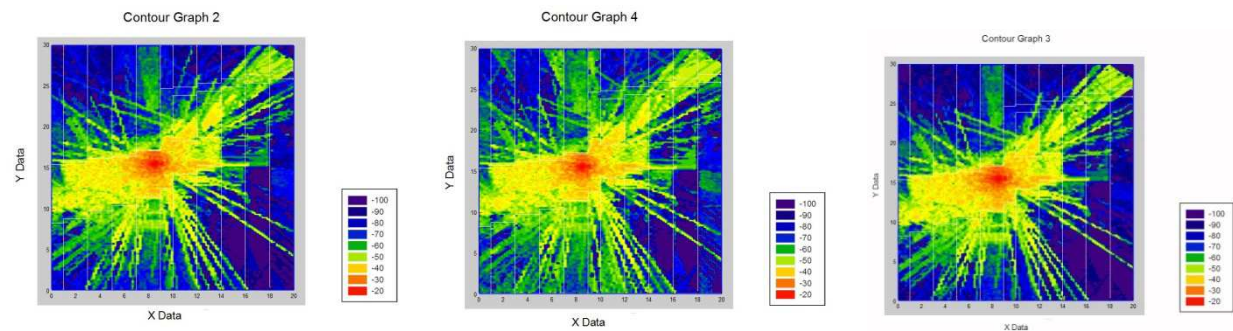
$X=10m$

Altura Antena $Z=5m$:

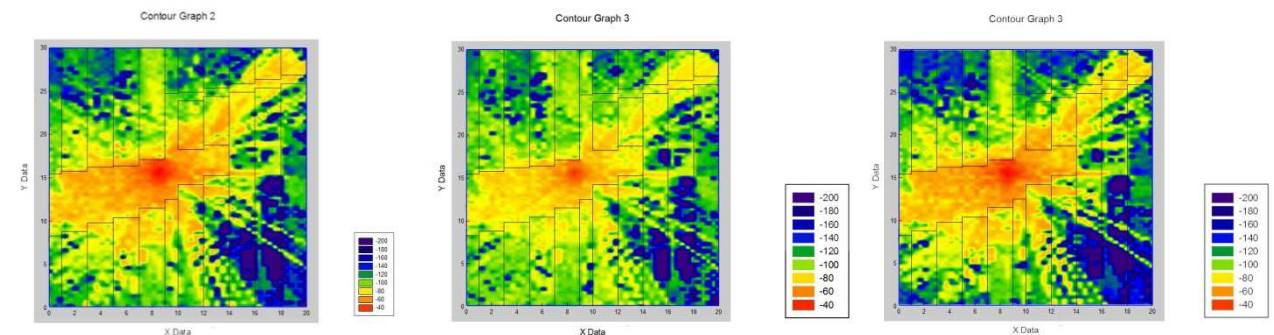


(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

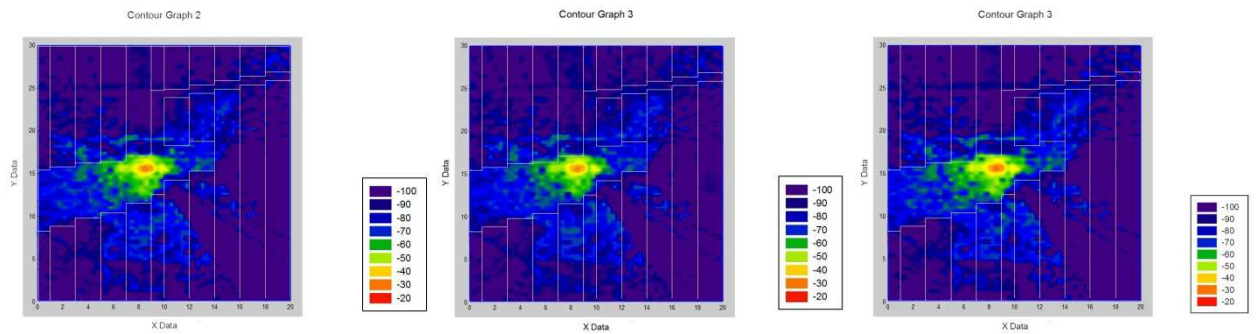
$Z=5m$; 0.2m-resolución-escala -150dBm



$Z=5m$; 0.2m-resolución-escala -200dBm

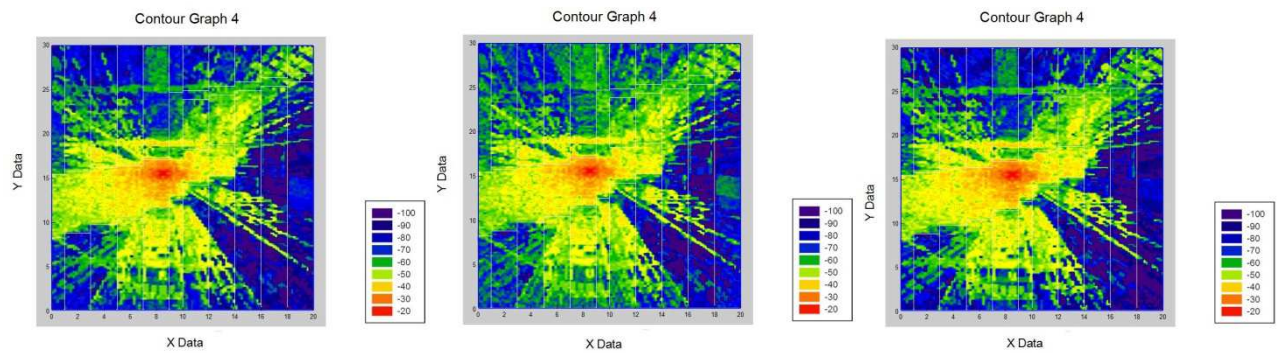


Altura Antena Z=9m:

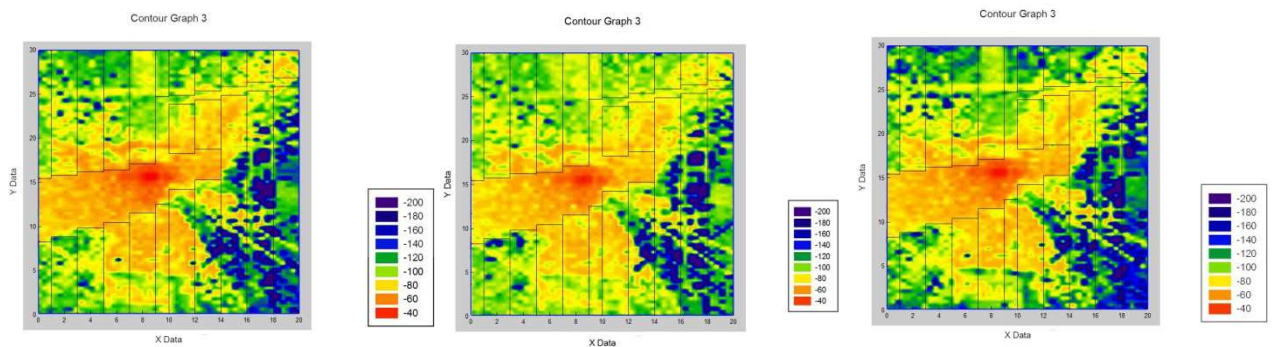


(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

Z=9m; 0.2m-resolución-escala -150dBm



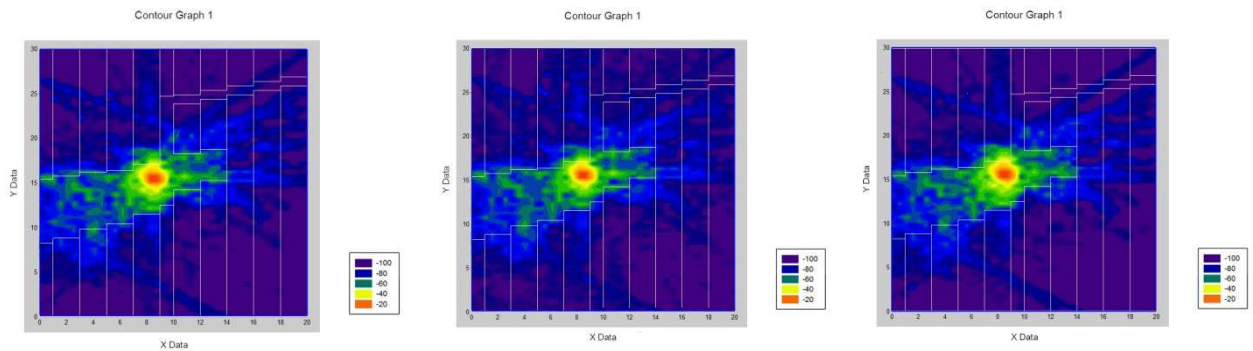
Z=9m; 0.2m-resolución-escala -200dBm



Escenario Parte 1: Resolución 0.5m

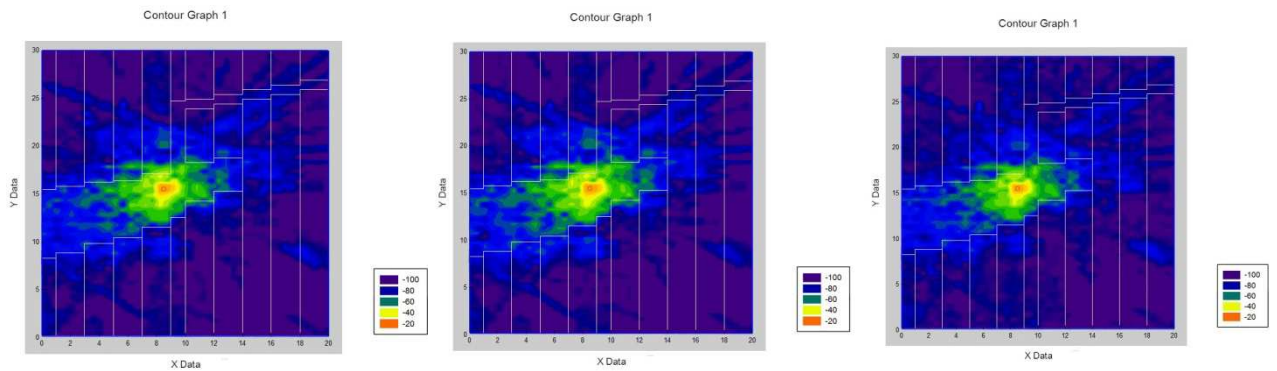
$X=10m$

Altura Antena $Z=5m$:



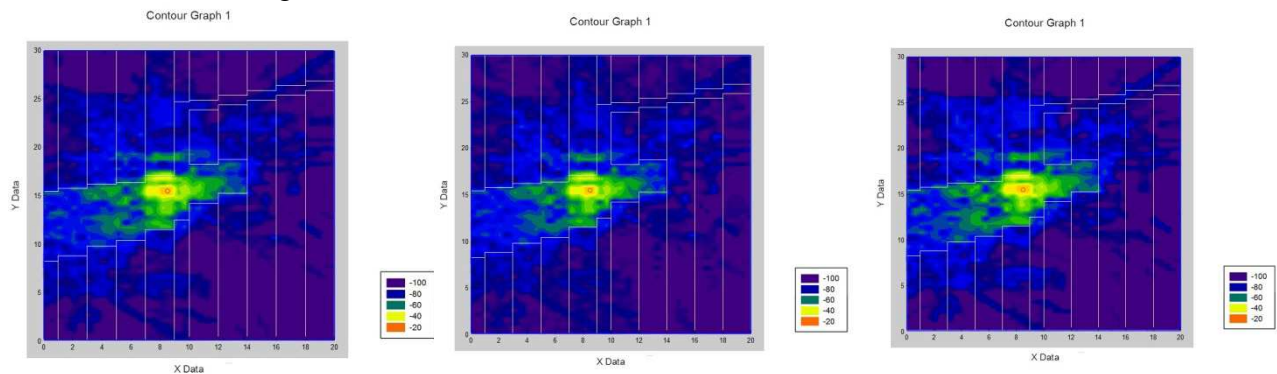
(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

Altura Parte Alta Galería $Z=7m$:



(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

Altura Galería Tobogán $Z=9.5m$:

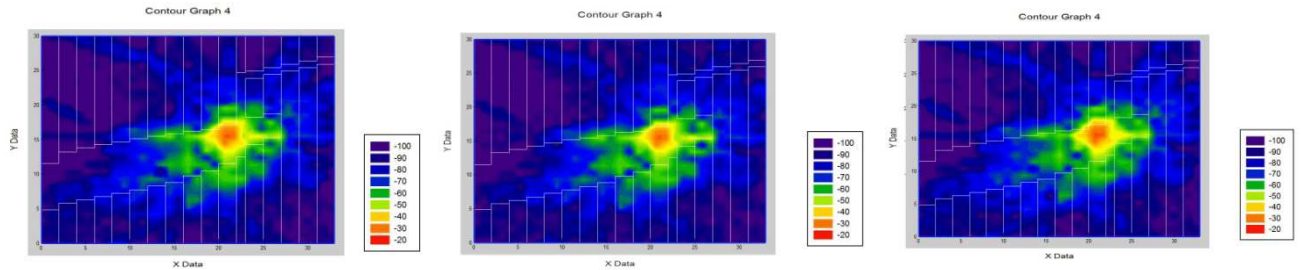


(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

Escenario Parte 1: Resolución 1m

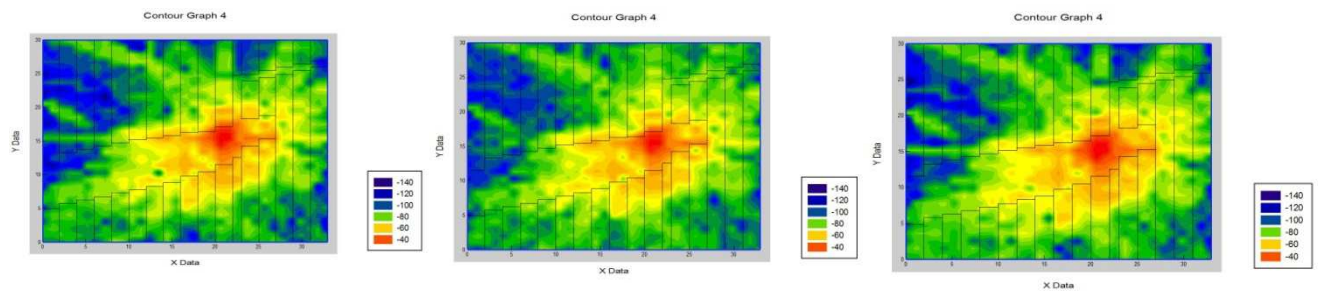
$X=20m$

Altura Antena $Z=5m$:

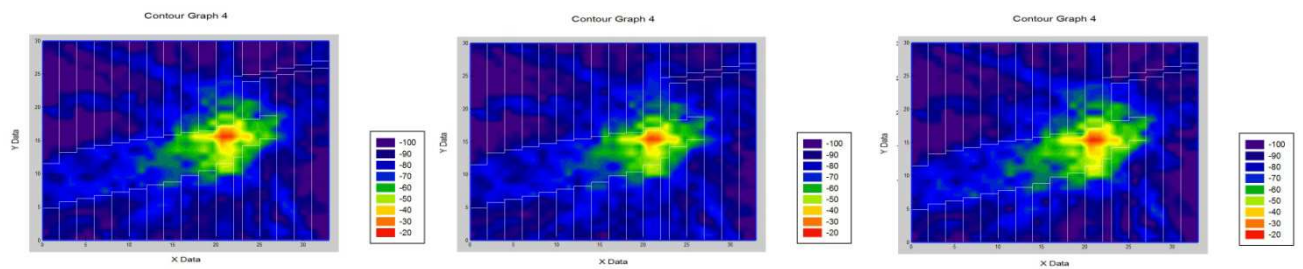


(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

$Z=5m$; 1m-resolución-escala -150dBm

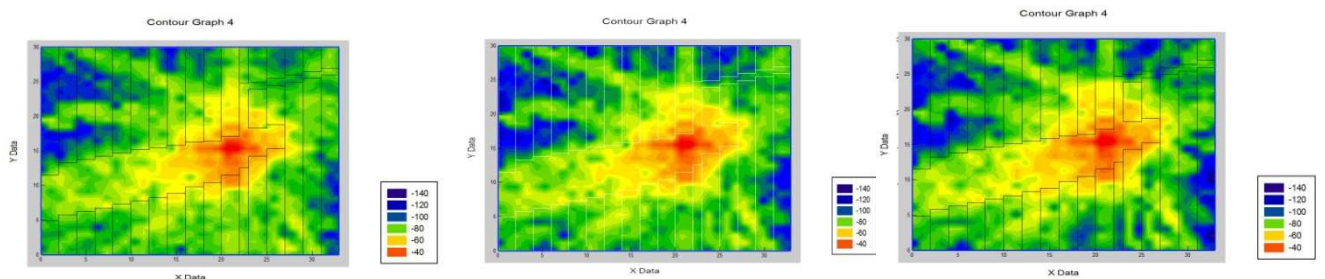


Altura Antena $Z=8m$



(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

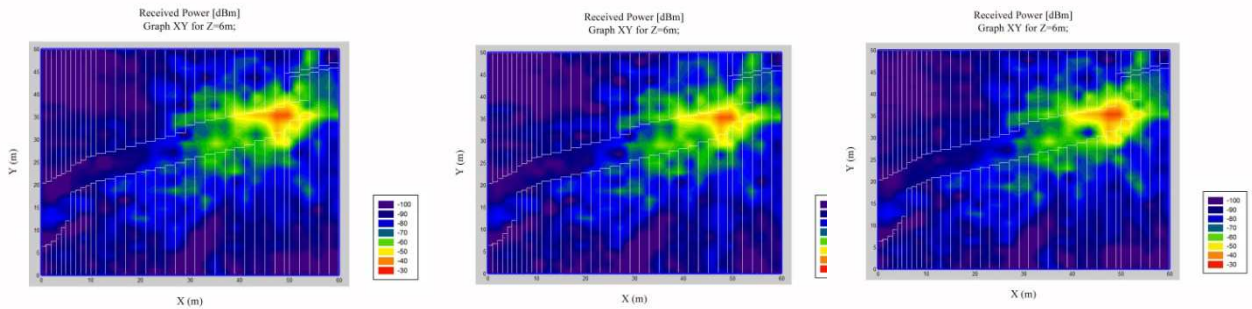
$Z=8m$; 1m-resolución-escala -150dBm



Escenario Parte 1: Resolución 2m

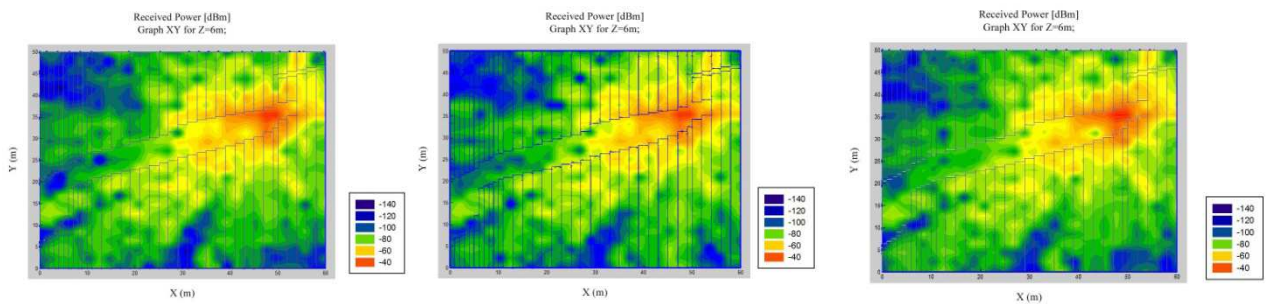
X=50m

Altura Antena Z=6m:

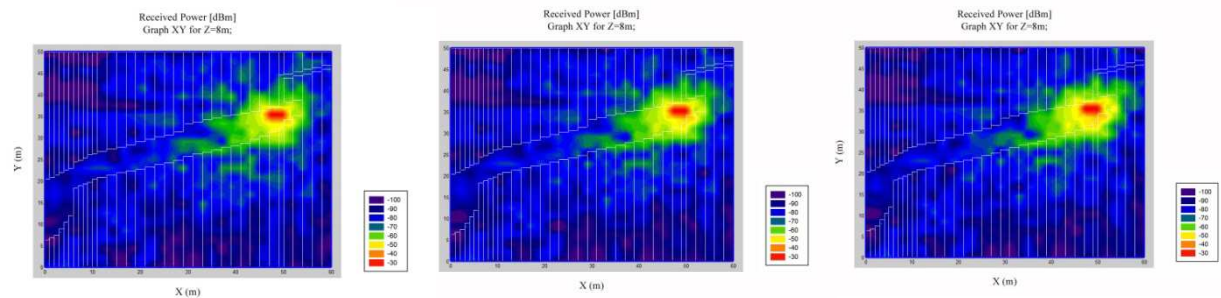


(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

Z=6m; 2m-resolución-escala -150dBm

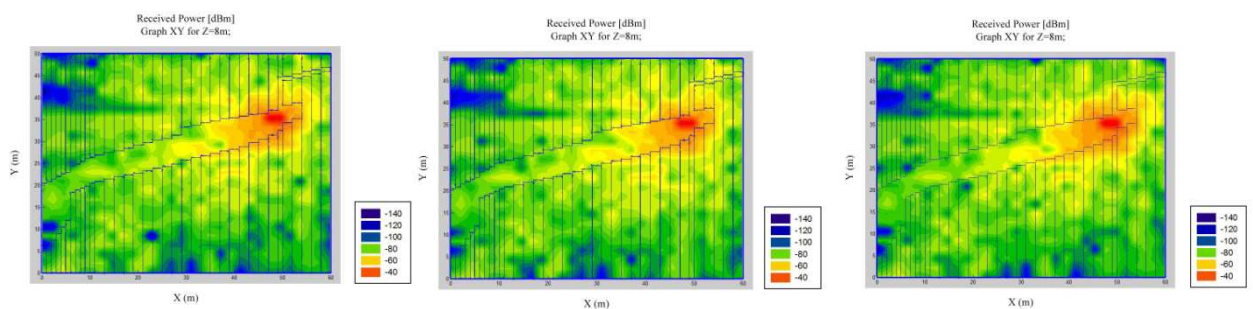


Altura Antena Z=8m:



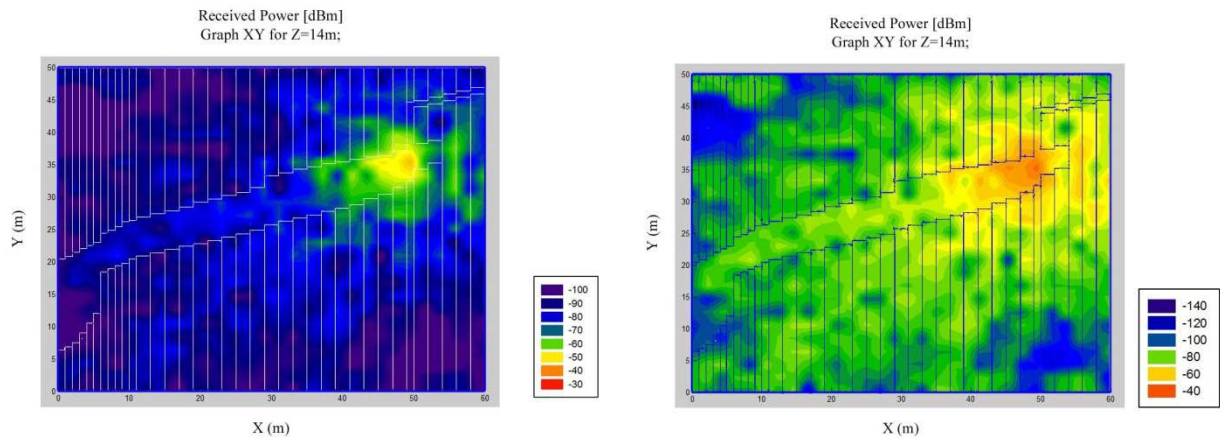
(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

Z=8m; 2m-resolución-escala -150dBm



Altura Antena Z=14m:

2m-resolución-escala -150dBm

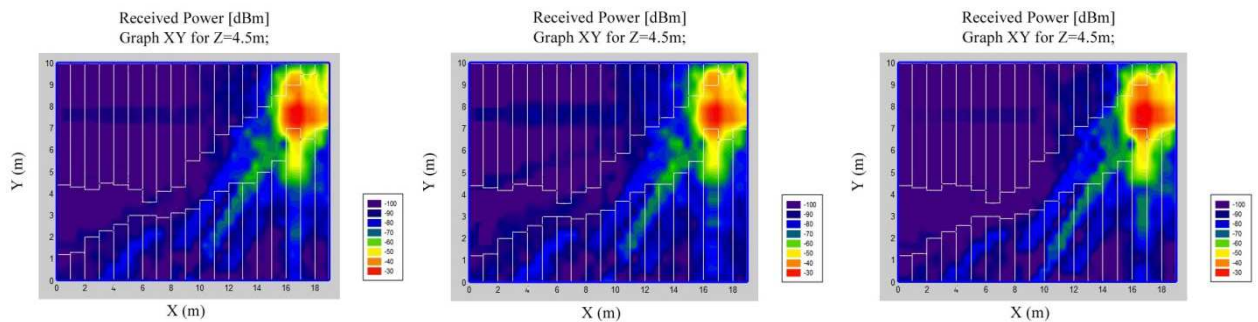


(a) Conductividad valor intermedio

Escenario Parte 2: Resolución 0.5m

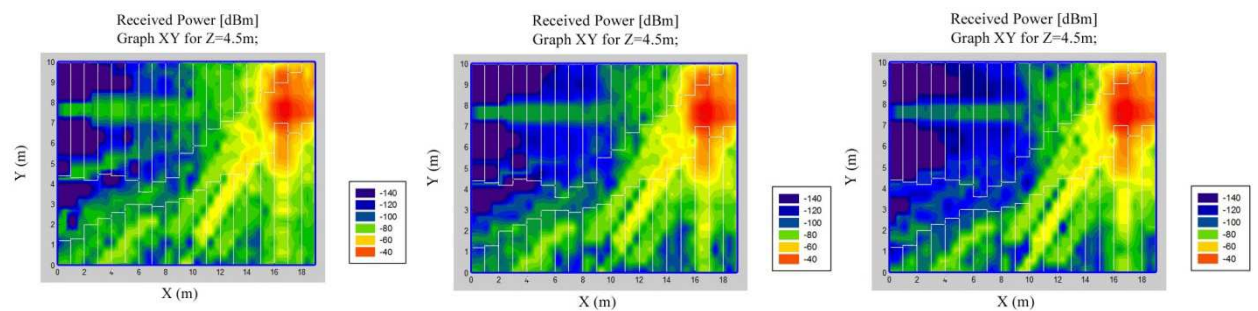
X=10m

Altura Antena Z=4.5m:

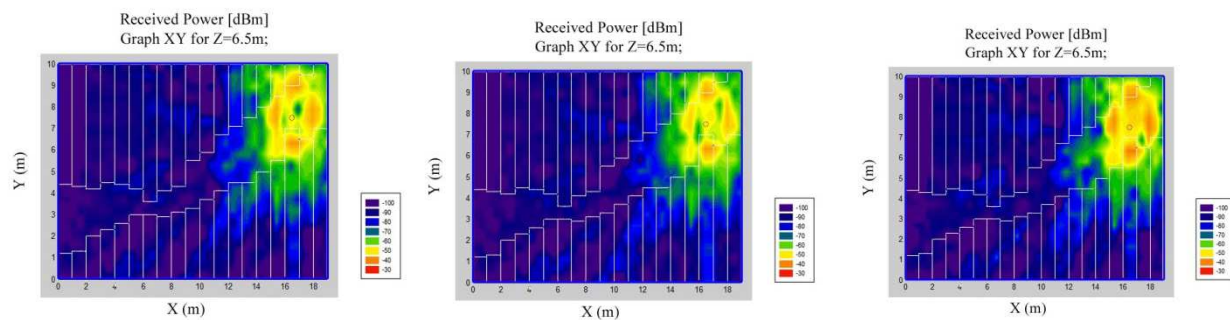


(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

Z=4.5m; 0.5m-resolución-escala -150dBm

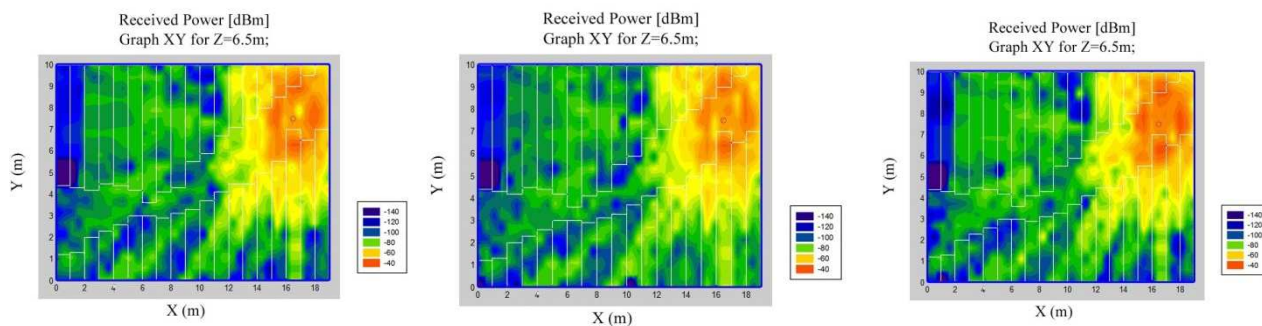


Altura Antena $Z=6.5\text{m}$:



(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

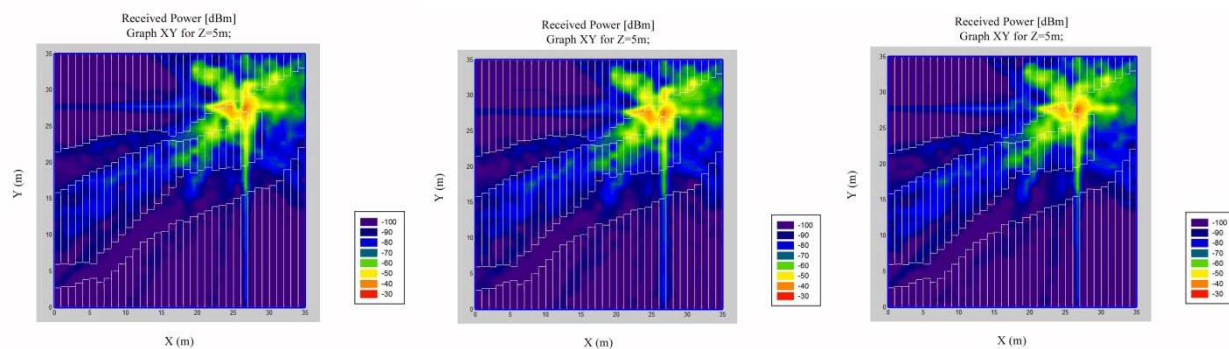
$Z=6.5\text{m}$; 0.5m-resolución-escala -150dBm



Escenario Parte 2: Resolución 1m

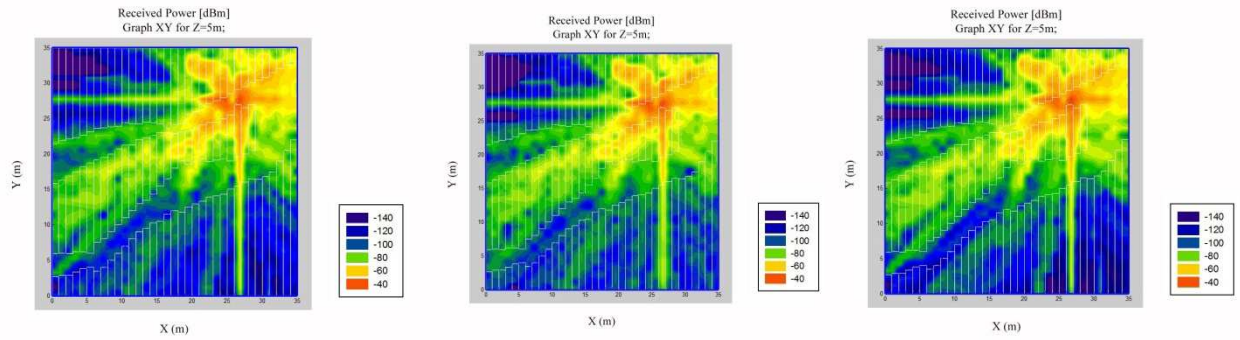
$X=20\text{m}$

Altura Antena $Z=5\text{m}$:

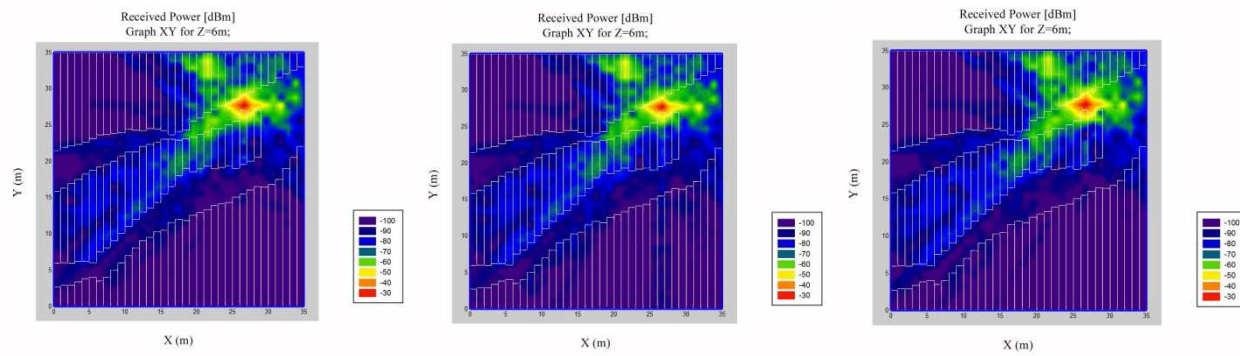


(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

Z=5m; 1m-resolución-escala -150dBm

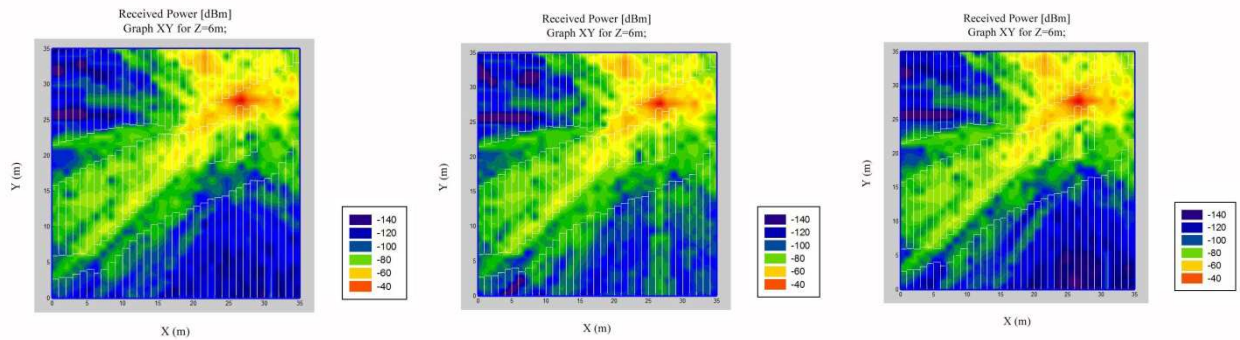


Altura Antena Z=6m:

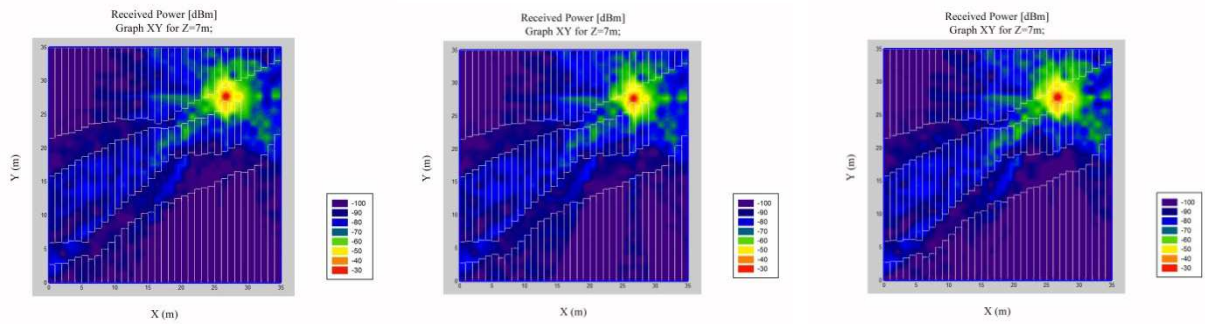


(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

Z=6m; 1m-resolución-escala -150dBm

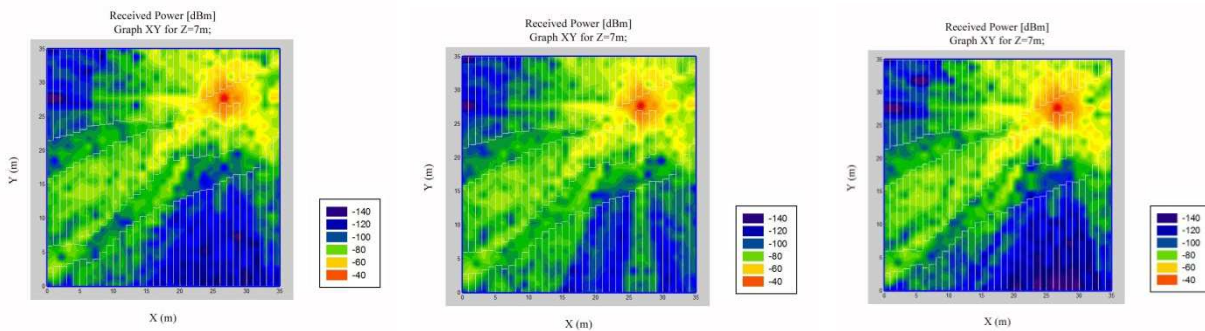


Altura Antena $Z=7\text{m}$:



(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

$Z=7\text{m}$; 1m-resolución-escala -150dBm

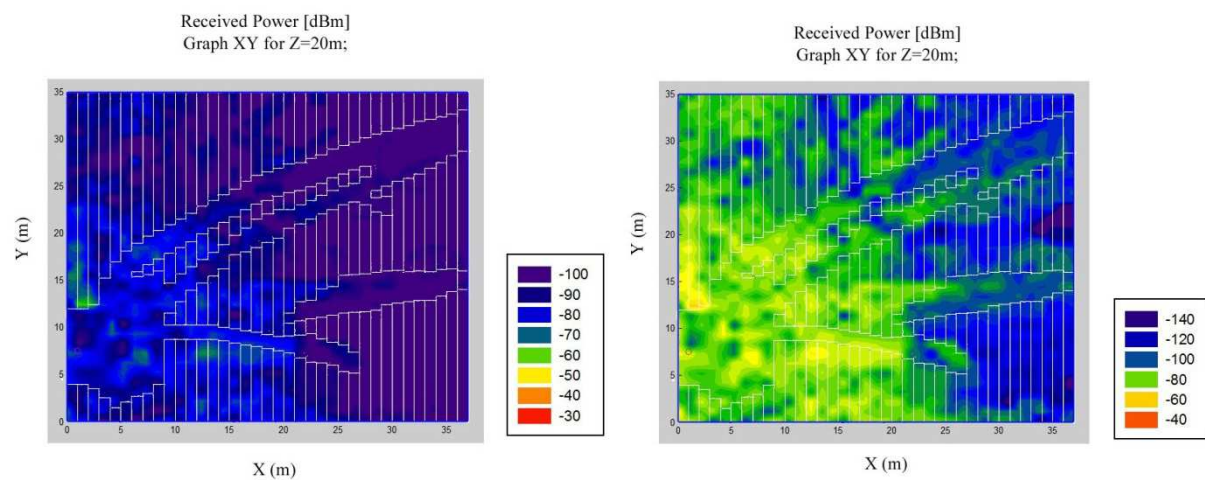


Escenario Parte 3: Resolución 1m

$X=20\text{m}$

Altura Antena $Z=20\text{m}$:

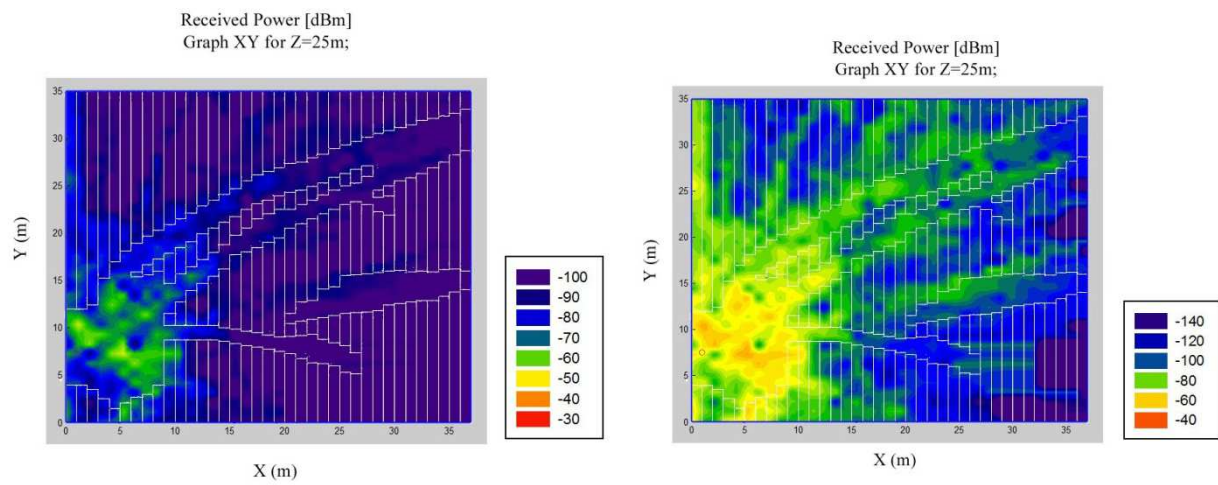
1m-resolución-escala -150dBm



(a) Conductividad valor intermedio,

Altura Antena $Z=25\text{m}$;

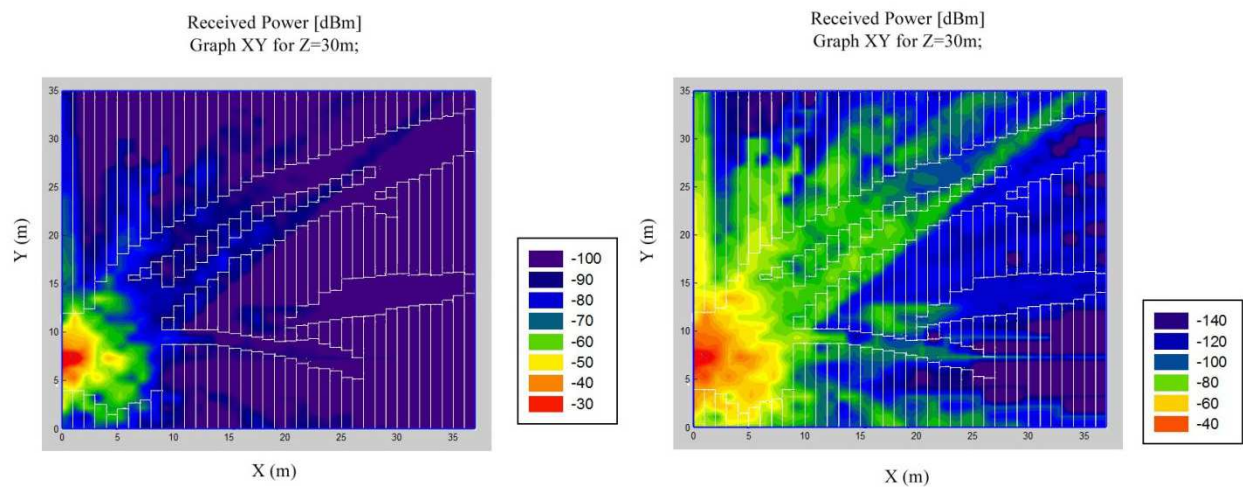
1m-resolución-escala -150dBm



(a) Conductividad valor intermedio

Altura Antena $Z=30\text{m}$:

1m-resolución-escala -150dBm

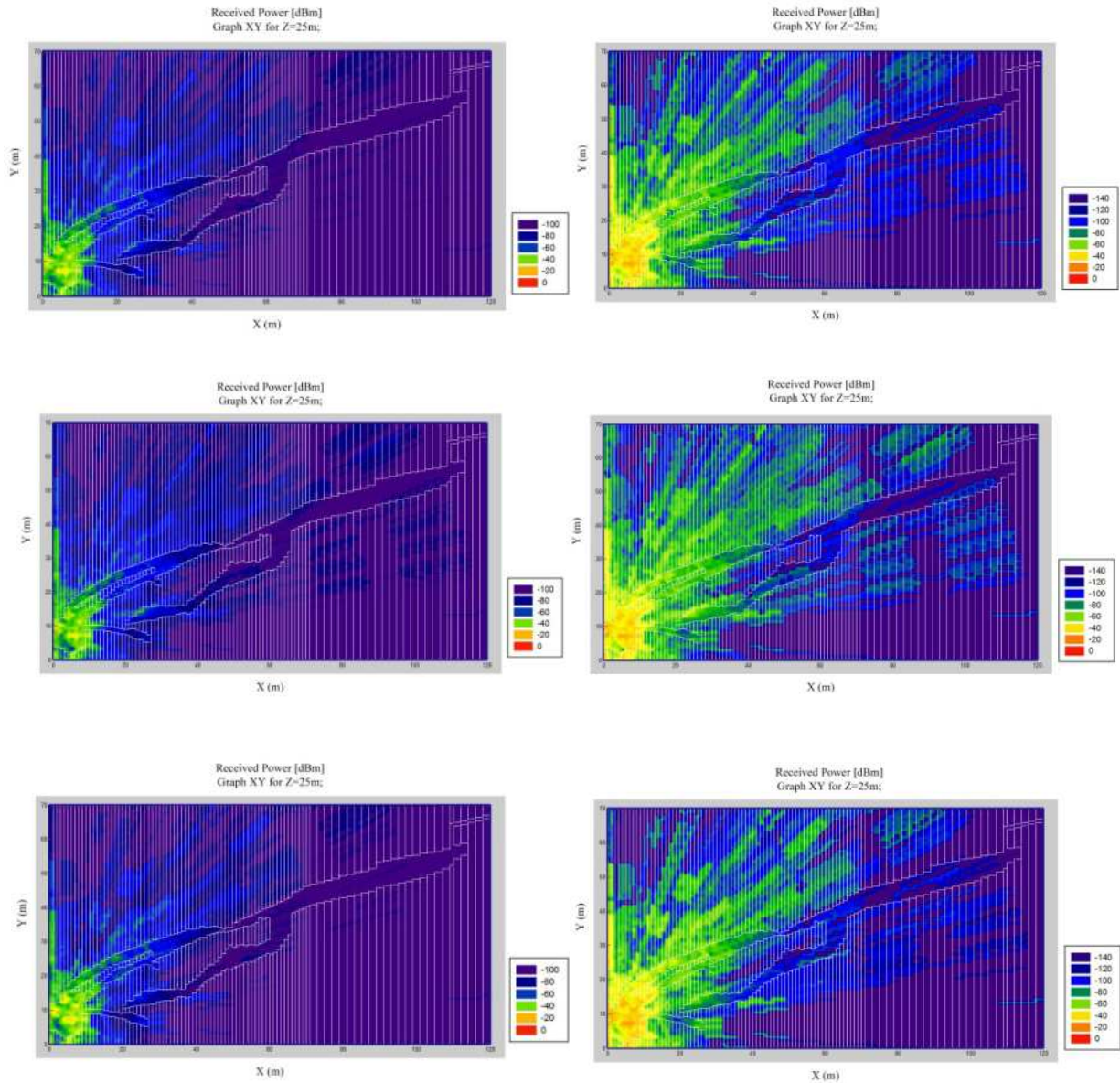


(a) Conductividad valor intermedio

Escenario Completo: Resolución 1m

Altura Antena Z=25m:

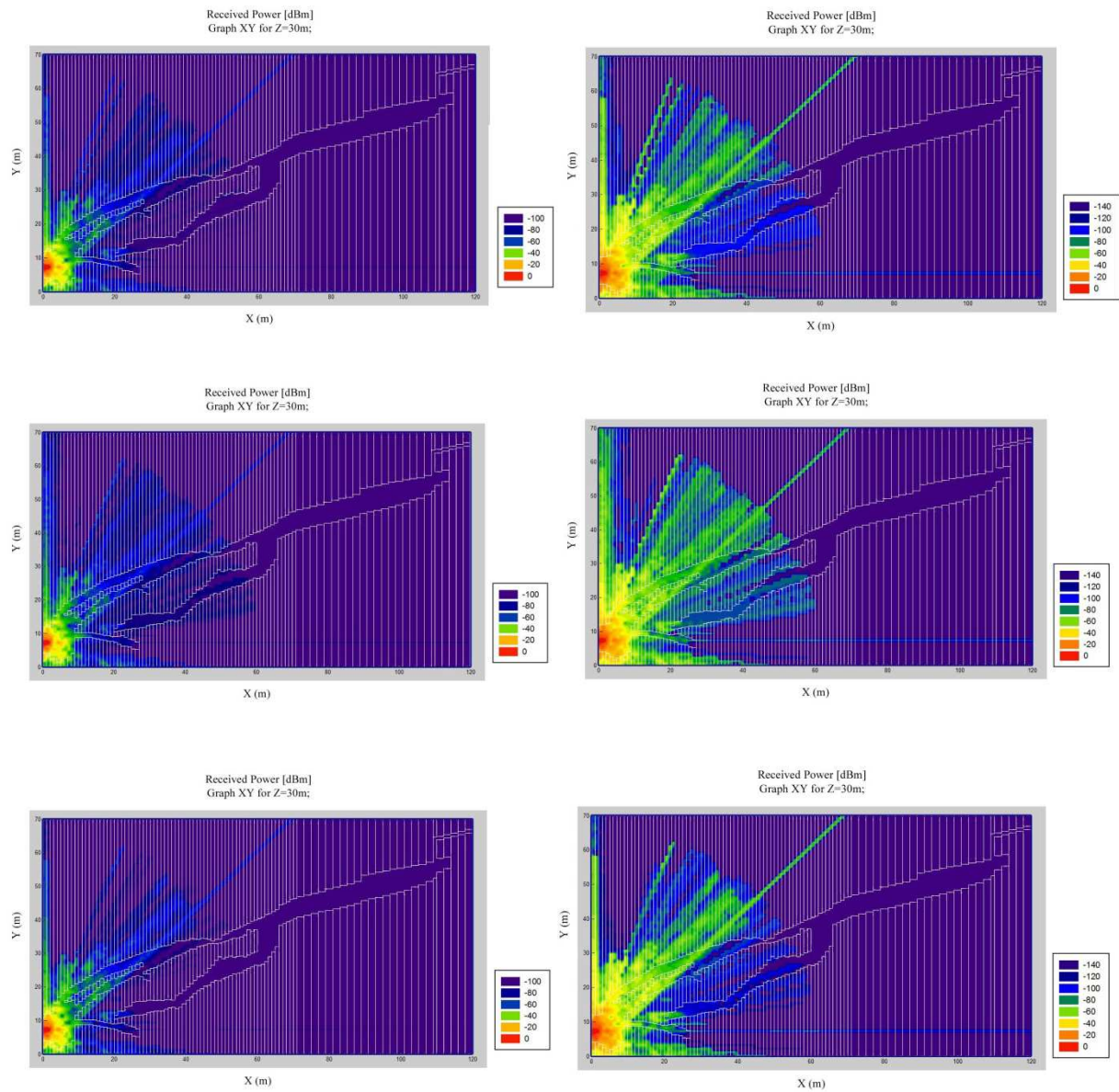
1m-resolución-escala -150dBm



(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

Altura Antena Z=30m:

1m-resolución-escala -150dBm

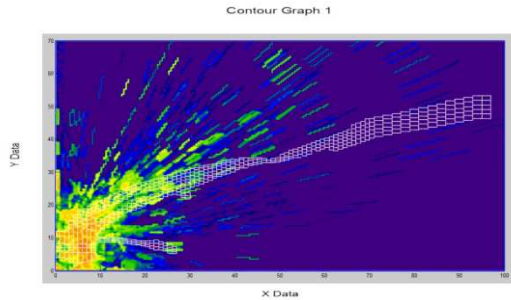


(a) Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c) valor máximo

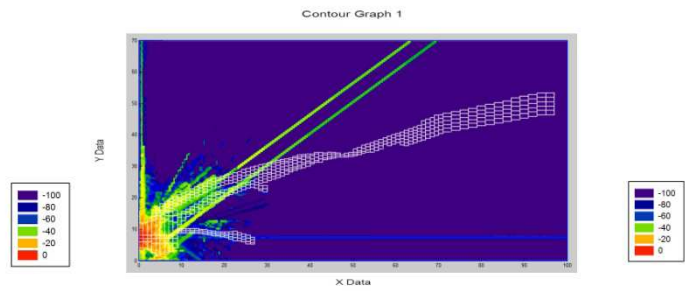
Escenario Entero, Material : Hormigón

Resolución 0.5m

Altura Antena Z=25m;

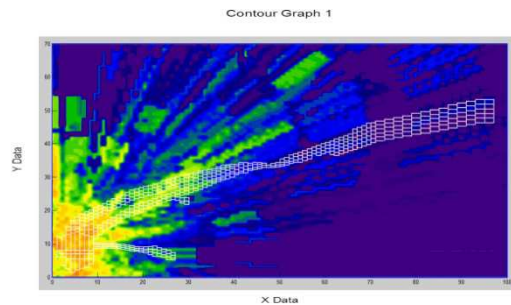


Altura Antena Z=30m:

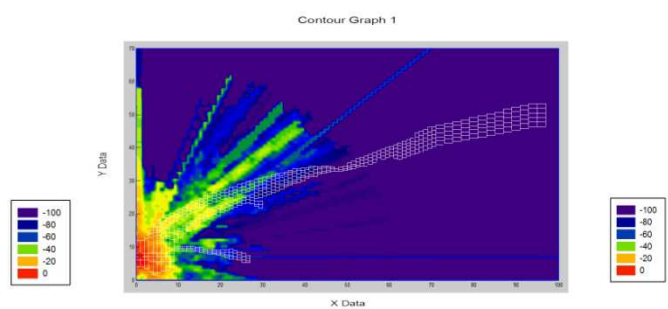


Resolución 1m

Altura Antena Z=25m;

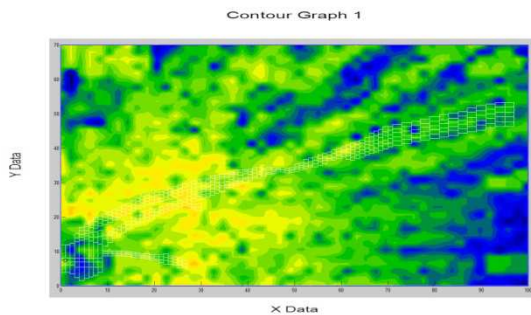


Altura Antena Z=30m:

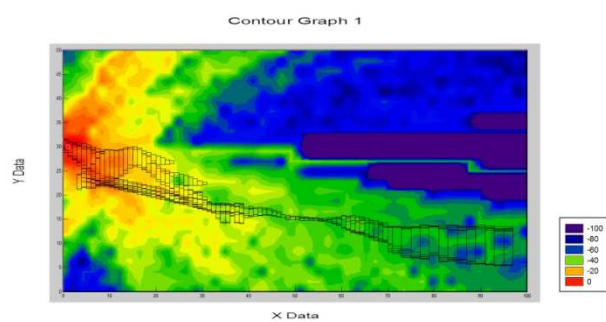


Resolución 2m

Altura Antena Z=10m;

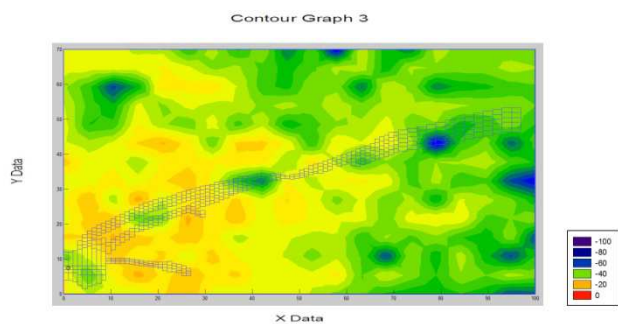


Altura Antena, Perfil Y=10m:

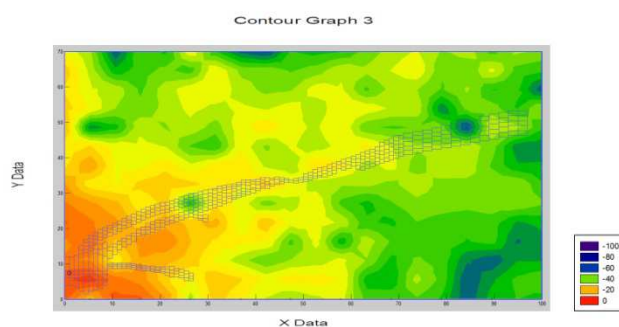


Resolución 5m

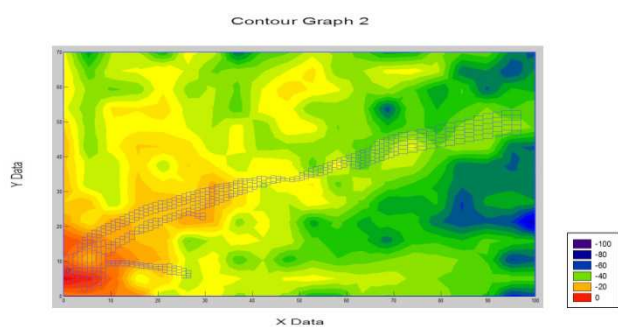
Altura Antena Z=10m;



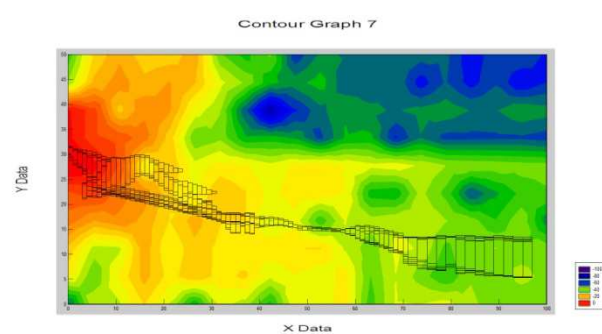
Altura Antena Z=25m:



Altura Antena Z=30m:



Altura Antena , Perfil Y=10m:



ANEXO II

Estimation of Wireless Coverage in Complex Cave Environments for Speleology Applications

Tomás Laborra⁽¹⁾, Leire Azpilicueta⁽¹⁾, Peio Lopez Iturri⁽¹⁾, Erik Aguirre⁽¹⁾,
 and Francisco Falcone*⁽¹⁾

(1) Electrical and Electronic Engineering Dept., UPNA, Navarre, Spain

Wireless communication systems can be found in a wide variety of environments such as industrial, scientific, home and building automation, vehicles and outdoor environments, mainly due to the development of smaller and cheaper devices and the increasing operational lifetime. In this paper, the feasibility of the deployment of a wireless communication system inside caves is presented. Specifically, a Wireless Sensor Network (WSN) at 868 MHz, 2.4 GHz and 5 GHz bands is studied. WSN in cave environments have great potential because communication systems for speleology and potholing are wired, including the systems used by emergency and rescue teams such as firefighters. In order to perform the radio propagation analysis, an in-house 3D Ray Launching simulation code has been employed, which provides accurate estimations of received power level for full complex indoor scenarios, as it takes into account the topology and the morphology of the scenario, including material properties. Fig. 1a shows the schematic representation of the considered scenario for this work, which corresponds to the dimensions of a real cave placed in Navarre. The estimated received power level for a height of 1.5m inside the cave is represented in Fig. 1b. Results confirm that there is a great dependence of network performance with the topology of the scenario. Therefore, an overall increase system efficiency can be achieved with the aid of this deterministic simulation method.

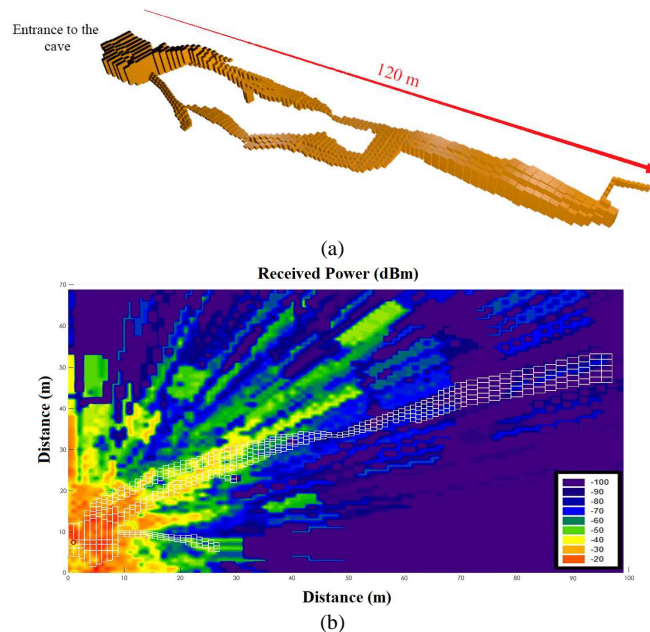


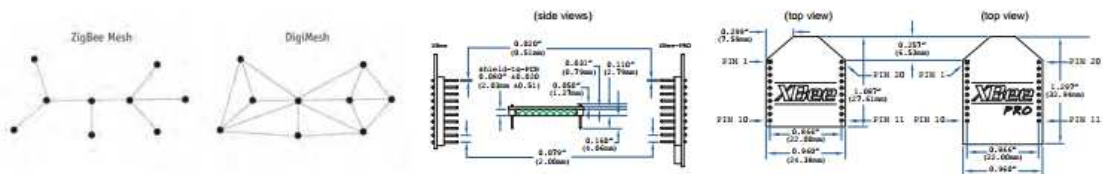
Figure 1. (a) Schematic representation of the cave implemented for the 3D Ray Launching simulation (b) Bi-dimensional plane with the Estimated Received Power (dBm) for a height of 1.5m, for a transmitter placed at the cave entrance.

ANEXO III

Ficha técnica de los Xbee-Pro 2.4GHz



Platform	XBee® DigiMesh® 2.4		XBee-PRO® DigiMesh® 2.4	XBee-PRO® DigiMesh® 2.4 (Int'l)
Performance				
RF Data Rate	250 Kbps			
Indoor/Urban Range	100 ft (30 m)	300 ft (90 m)	200 ft (60 m)	
Outdoor/RF Line-of-Sight Range	300 ft (90 m)	1 mile (1.6 km)	2500 ft (750 m)	
Transmit Power	1 mW (+0 dBm)	63 mW (+18 dBm)	10 mW (+10 dBm)	
Receiver Sensitivity (1% PER)	-92 dBm	-100 dBm		
Features				
Serial Data Interface	3.3V CMOS serial UART			
Configuration Method	AT & API			
Frequency Band	2.4 GHz ISM			
Interference Immunity	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)			
Serial Data Rate	Up to 115.2 Kbps			
ADC Inputs	(6) 10-bit ADC inputs			
Digital I/O	13			
Antenna Options	Chip, Wire Whip, U.FL, RPSMA			
Networking & Security				
Encryption	128-bit AES			
Reliable Packet Delivery	Retries/Acknowledgments			
Addressing Options	PAN ID, channel, 64-bit address			
Channels	16	12		
Power Requirements				
Supply Voltage	2.8 – 3.4VDC			
Transmit Current	45 mA	250 mA (Wire, Chip, U.FL), 340 mA (RPSMA)	150 mA (Wire, Chip, U.FL), 180 mA (RPSMA)	
Receive Current	50 mA	55 mA		
Power-Down Current	<50 uA			
Regulatory Approvals				
FCC (USA)	Yes			
IC (Canada)	Yes			
ETSI (Europe)	Yes	Yes (Max Tx 10 mW)	Yes	
C-TICK Australia	Yes			
Telec (Japan)	Yes	No	Yes	



ANEXO IV

Ficha técnica de Analizador RF Field Fox N9912A utilizado para recepción.



Cable and Antenna Analyzer

Description	Specification	Typical		Supplemental Information
		10 minute warm up	90 minute warm up	
Frequency Range				
Option 104	2 MHz to 4 GHz			
Option 106	2 MHz to 6 GHz			
Frequency Reference				
Accuracy	±2 ppm	±2 ppm		
Aging Rate	±1 ppm/yr	±1 ppm/yr		
Temperature Stability	±1 ppm over 0 to 55 °C	±1 ppm		
Frequency Resolution				
2 MHz to 1.6 GHz	2.5 kHz			
> 1.6 GHz to 3.2 GHz	5 kHz			
> 3.2 GHz to 6 GHz	10 kHz			
Resolution (Number of data points)				
	101, 201, 401, 601, 801, 1001, 1601, 4001, 10001			
	Custom number of points can be set using SCPI			
Measurement Speed				
Return Loss				
1.75 GHz – 3.85 GHz, 1001 points, Cal ON				1.5 ms/point (nominal)
DTF				
0 to 500 ft, 601 points, Cal ON				2.4 ms/point (nominal)
Output Power (RF Out Port)				
High				
2 MHz to 4 GHz				< +8 dBm, +6 dBm (nominal)
> 4 GHz to 6 GHz				< +7 dBm, +2 dBm (nominal)
Low (Typically 31 dB below high power)				
2 MHz to 4 GHz				< -23 dBm, -25 dBm (nominal)
> 4 GHz to 6 GHz				< -24 dBm, -25 dBm (nominal)
Immunity to Interfering Signals				
				+16 dBm (nominal)

...and depend on its durability and convenience

FieldFox



Cable and Antenna Analyzer (continued)

Description	Specification	Typical	
		10 minute warm up	90 minute warm up
Directivity			
Corrected with OSL calibration ¹	>42 dB	>42 dB	
Corrected with QuickCal (Option 111) ³			≥42 dB
Raw			
2 MHz to 3.5 GHz			> 20 dB
> 3.5 GHz to 6 GHz			> 14 dB
Source Match			
Corrected with OSL calibration ¹	> 36 dB	> 36 dB	
Corrected with QuickCal (Option 111) ³			≥35 dB
Raw			
2 MHz to 3 GHz			> 25 dB
> 3 GHz to 6 GHz			> 16 dB
Reflection Tracking			
Corrected with OSL calibration ¹	±0.06 dB	±0.06 dB	
Corrected with QuickCal (Option 111) ³			±0.15 dB
Reflection Dynamic Range			
Reflection (RF Out port) (High power out)			
2 MHz to 4 GHz		60 dB	
> 4 GHz to 6 GHz		55 dB	
Maximum Measurable Cable Loss Using 1-Port CAT Measurement Model ²			
		Ref1 Dyn Range /2	
Transmission Dynamic Range(Option 110)			
300 Hz IF Bandwidth			
2 MHz to 2 GHz		72 dB	
> 2 GHz to 3 GHz		67 dB	
> 3 GHz to 5 GHz		58 dB	
> 5 GHz to 6 GHz		49 dB	
Return Loss			
Display Range	0 to 100 dB		
Resolution	0.01 dB		
VSWR			
Display Range	1 to 500		
Resolution	0.01		
Cable Loss			
Display Range	0 to 100 dB		
Resolution	0.01 dB		

Índice de Figuras y Tablas:

Figura 3.1. a) Prototipo TEDRA. b) Esquema funcionamiento. [4], [5].....	9
Figura 3.2. a) Genéfono. b) Esquema de conexión de los genéfonos mediante pinzas..	10
Ficha técnica del Genéfono de la empresa FHF Funke + Huster Fernsig GmbH	10
Figura 3.3 . “Leaky feeder”	11
Figura 3.4. Esquema de infraestructura en mina.	12
Solución propuesta por Mine Site Technologies para el despliegue de una red.	12
Figura 3.5. Representación de propagación natural en túnel.[6].....	12
Figura 3.6. Topologías típicas de WSN’s.....	13
Figura 3.7. Grupos de trabajo del estándar del IEEE 802.15. [7]	14
Figura 3.8. Capas Zigbee.....	15
Figura 3.9. Topologías estrella y punto-a-punto, típicas de las redes 802.15.4. [7].....	16
Figura 3.10. Representación de envío de datos del corazón al móvil.	17
Figura 3.11. Representación de arquitectura de red IEEE 802.15.6.....	18
Figura 3.12. Representación de reflexión y refracción.....	19
Figura 3.13. Representación de dispersión. 20 a) Representación en perfil de propagación de ondas b) Representación en planta.....	20
Figura 3.14. Representación de la propagación de ondas en un escenario hostil [10], [11].	20
Figura 3.15. Representación de la propagación multitrayecto en un entorno hostil (túnel). Imagen adquirida del simulador de trazado de rayos de la empresa AWE-Communications.....	21
Figura 3.16. Representación esquemática de las pruebas descritas en [13].	22
Figura 3.17. Fotografía de una galería de una mina antigua obtenida de [21].	22
Figura 4.1. (a) Situación geográfica de Navarra. (b) Área de Navarra en la que se encuentra Lantz.....	24
Figura 4.2. (a) Ubicación de la cueva. (b) Área de Navarra en la que se encuentra Lantz. Datos obtenidos por el G.E.S (Grupo Espeleología Satorrak)	25
Figura 4.3. Mapa geológico correspondiente a la zona de estudio y su respectiva leyenda. Mapa extraído de la página web del Gobierno de Navarra de la sección de geología. Remarca que dependiendo de la fecha de los mapas consultados, los valores correspondientes al número 47 diferían. Se toma por bueno el valor más actualizado..	26
Figura 4.4. Valores de resistividad de diferentes rocas y minerales (Orellana, 1982) [30].	29
Figura 4.5. Valores de porosidades, permeabilidades y resistividades. [28].....	30
Figura 4.6. Rangos de resistividades y conductividades en distintos tipos de materiales. [28]	30
Figura 4.7. Gráfica de conductividad y constante dieléctrica de una muestra en Whitestone, en función de la frecuencia. [33].	31
Figura 4.8. Ejemplo de un perfil de un trabajo típico de prospección geofísica de la tierra con distintos materiales, sus resistividades representadas en escala de colores. ..	31
Imagen tomada de la empresa Wide World de Barakaldo. Perfil en Miribilla (Bilbao)	31
Tabla 1. Tabla de rangos de conductividades y resistividades recogidas en distintas fuentes.....	32
Figura 4.9. Variación de la velocidad con la frecuencia en el rango de frecuencias de trabajo de un georradar para un medio con $\epsilon_r=10$. [34].....	33
Tabla 2. Valores de conductividades elegidos.....	33

Figura 4.10. Representación de la dependencia de la constante dieléctrica con la porosidad en las rocas. Rocas saturadas con agua y ácido clorhídrico. [33].....	34
Figura 4.11. Tabla de valores de distintos tipos de materiales y rocas con sus valores de permitividad relativa correspondiente. [35].....	34
Tabla 3. Valores de conductividades y constantes dieléctricas elegidos.....	35
Figura 4.12. Mapa topográfico cueva Aierdi-VIII. Área de estudio marcada en rojo. G.E.Satorrak	35
Figura 4.13. Material imprescindible para la realización de topografía espeleológica. Foto: Jose Antonio Sarratea (G.E.Satorrak)	36
Figura 4.14. (a) Planta y perfil de Aierdi-VIII. (b) Visualización 3D de la cueva Aierdi VIII.	36
Datos obtenidos del software Visual Topo.....	36
Figura 4.15. Fotografías de la galería principal. G. E. Satorrak.....	37
Figura 4.16. Representación geométrica discreta de una galería minera definiendo en cada cuboide coeficientes de reflexión, difracción, rugosidad, etc. [10].....	38
Figura 4.17. Representación de la cueva en Matlab mediante cuboides. (a) Escenario de todo aire menos los cuboides de la cueva. (b) Escenario de todo cuboides menos la cueva (aire).	40
Figura 4.18. Evolución de la construcción del escenario	40
Figura 4.19. Planta, perfil y perspectiva del primer escenario simulado.	41
Figura 4.20. Resultados en planta, a la altura de la antena y a distintas resoluciones...	42
Figura 4.21 Representación de los valores de potencia, para un mismo plano (Y=10m; Z=30m), con distintos valores de resolución.....	42
Figura 4.22 Resultados en perfil, a la altura de la antena y a resoluciones de 2 y 5m. .	43
Figura 4.23. (a) Agilent CSA Spectrum Analyzer N 1996A utilizado como generador. (b) Antena RS ECOM5-2400 de 2.4GHz.....	44
Figura 4.24. (a) Analizador RF Field Fox N9912A utilizado para recepción.....	44
Figura 4.25. Leica GST20-9 Wooden Telescopic Tripod	44
Figura 4.26. Módulo XBee-Pro.	45
Figura 4.27. Programa en Java para la lectura del PER.	45
Figura 4.28. Programa en Java para el envío de paquetes en el caso del PER.....	46
Figura 4.29. Representación de las zonas definidas en las medidas.	47
Figura 4.30 Fotografía tomada en la galería Grande en el tramo más escalonado. G.E. Satorrak.....	47
Figura 4.31. Fotografía tomada en la galería Grande tomando datos con la antena y el analizador de espectros portable. G.E. Satorrak	48
Figura 4.32. Gráfica representando la radial de la galería Grande en niveles de potencia recibidos.	48
Figura 4.33. Fotografía tomada desde la parte alta de la galería Tobogán hacia el emisor (no visión directa).	49
Figura 4.34. Gráfica representando la radial de la galería Tobogán en niveles de potencia recibidos.	49
Figura 4.35. Fotografía tomada en el comienzo del estrechamiento. G.E.Satorrak	50
Figura 4.36. Gráfica representando la radial de la galería del estrechamiento en niveles de potencia recibidos.	50
Figura 4.37. Gráfica representando el PER en cada punto de medición.	51
Figura 4.38. Gráfica representando el PER en el punto de la zona 2.	52
Figura 4.39. Representación de los planos de corte para las siguientes gráficas.	53
Figura 4.40 Representación de los planos de corte para las siguientes gráficas.	53

Figura 4.41 a) Representación de la cueva en cuboides. b) Representación de la roca en cuboides y la cueva como aire (simulada).....	54
Figura 4.42. a) Mapa de potencias a $z=5\text{m}$ con conductividad 0.01 S/m . b) Mapa de potencias a $z=5\text{m}$ con conductividad 0.005 S/m . c) Mapa de potencias a $z=5\text{m}$ con conductividad 0.0001 S/m	54
Figura 4.43. a) Mapa de potencias a $z=9\text{m}$ con conductividad 0.01 S/m . b) Mapa de potencias a $z=9\text{m}$ con conductividad 0.005 S/m . c) Mapa de potencias a $z=9\text{m}$ con conductividad 0.0001 S/m	55
Figura 4.44. Representación de la roca en cuboides y la cueva como aire del escenario Parte I – 20m	55
Figura 4.45. a) Mapa de potencias a $z=5\text{m}$ con conductividad 0.01 S/m . b) Mapa de potencias a $z=5\text{m}$ con conductividad 0.005 S/m . c) Mapa de potencias a $z=5\text{m}$ con conductividad 0.0001 S/m	56
Figura 4.46. a) Planta del escenario definido como Parte I- 50m correspondiente a la Galería Grande. b) Perspectiva del escenario definido como Parte I- 50m	56
Figura 4.47. Conductividad valor intermedio, (b) valor mínimo y (c)valor máximo ...	57
Figura 4.48. Planos XY del escenario definido como Parte I- 50m correspondiente a la Galería Grande.....	57
Con conductividades de valor intermedio, valor mínimo y valor máximo respectivamente.	57
Figura 4.49. Representación en perspectiva de la Parte II- 10m con la roca definida como cuboides.	58
Figura 4.50. Resultados de los mapas de potencia de la Parte II- 10m con distintas conductividades: (a) Conductividad máxima (0.01 S/m). (b) Conductividad media (0.005 S/m). (c) Conductividad mínima (0.0001 S/m).....	58
Figura 4.51. Resultado de mapa de potencias con conductividad de valor 0.005 S/m	59
Figura 4.52 Representación del escenario correspondiente a la Parte II- 20m sin representar los cuboides como roca sino como que como cueva	59
Figura 4.53. Resultados de los mapas de potencia de la Parte II- 20m con distintas conductividades: (a) Conductividad máxima (0.01 S/m). (b) Conductividad media (0.005 S/m). (c) Conductividad mínima (0.0001 S/m).....	60
Figura 4.54. Representación del escenario correspondiente a la Parte III- 20m , con cuboides definidos como cueva (aire).	61
Figura 4.55. Resultados de los mapas de potencia de la Parte III- 20m con distintas alturas: (a) Conductividad media (0.005 S/m), altura $Z=30\text{m}$. (b) Conductividad media(0.005 S/m), altura $Z=25\text{m}$	61
Figura 4.56 Gráfica: representación de los primeros 20m de la radial de 50m , comparado con valores obtenidos a partir de las simulaciones.	62
Figura 4.57 Gráfica: representación del error cometido entre las distintas simulaciones con respecto a las medidas. Indicado el error medio de los tres.....	63
Figura 4.58 Gráfica: representación de la radial de 50m , comparado con valores obtenidos a partir de las simulaciones.	64
Figura 4.59. Gráfica: representación del error cometido entre las distintas simulaciones con respecto a las medidas. Indicado el error medio de los tres.....	64
Figura 4.60. Gráfica: representación de la radial de 15 , comparado con valores obtenidos a partir de las simulaciones.	65
Figura 4.61. Gráfica: representación del error cometido entre las distintas simulaciones con respecto a las medidas. Indicado el error medio de los tres.....	65
Figura 4.62 Representación de los mapas de cobertura. Izquierda: mapa correspondiente a la cueva completa con material definido como hormigón. Derecha:	

mapa correspondiente a la cueva completa con material definido como conductividad intermedia (0.005 S/m). 66

Figura 4.63. Representación 3D de la galería Grande, incorporando los mapas de valores de potencia, correspondientes a distintas alturas. 67

Figura 4.64. Representación 3D de la galería del estrechamiento. (a) Galería del estrechamiento vista desde el otro lado de la fuente. (b) Galería del estrechamiento vista desde el lado de la fuente. 67